

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Obrábění žárových nástřiků v podmínkách letecké výroby

Machining of Thermal Spraying in Terms of Aircraft Production

Student:

Bc. Jiří Tengler

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Jiří Tengler

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

2303T002 Strojírenská technologie

Specializace:

20 Strojírenská technologie

Téma:

Obrábění žárových nástřiků v podmínkách letecké výroby
Machining of Thermal Spraying in Terms of Aircraft Production

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Obecná charakteristika obrábění žárových nástřiků.
3. Návrh experimentálního postupu obrábění.
4. Zpracování výsledků.
5. Závěr a doporučení.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Brno : MM Publishing Praha, 2008, 235 s. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [2] ČEP, Robert. *Zkoušky nástrojů z řezné keramiky v podmínkách přerušovaného řezu – disertační práce*. Ostrava : VŠB – TU Ostrava Fakulta strojní, 2005. 101 s.
- [3] WHITNEY, E. Dow. *Ceramics Cutting Tools – Materials, Development and Performance*. Gainesville, Florida : Noyes Publication New Jersey, 1994, 350 p. ISBN 0-8155-1355-0.
- [4] ZAJAC, Jozef; JURKO, Jozef; ČEP, Robert. *Top trendy v obrábění, II. část – Nástrojové materiály*. Žilina : Media/ST, s.r.o. Žilina, 2006. 193 s. ISBN 80-968954-2-7.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí diplomové práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



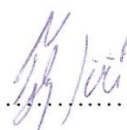

doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 12.5.2016

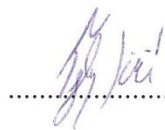


podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 12.5.2016


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce: Bc. Jiří Tengler

Adresa trvalého pobytu autora práce: Pod Kopcem 210, 747 56 Dolní Životice

Anotace diplomové práce

TENGLER, J. *Obrábění žárových nástřiků v podmínkách letecké výroby: diplomová práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie, 2016, 76 s. Vedoucí práce: Zlámal, T.

Diplomová práce se zabývá soustružením žárově stříkaných abradable povlaků používaných v leteckém průmyslu. V práci se testovaly dva druhy vyměnitelných břitových destiček s různým poloměrem zaoblení řezné hrany. Pro soustružení abradable nástřiků byly zvoleny řezné parametry, které byly pro všechny druhy nástřiků a vyměnitelné břitové destičky stejné. Během procesu obrábění se měřily složky řezných sil pro každou vyměnitelnou břitovou destičku a pro každý žárový nástřik. Následně došlo k vyhodnocení naměřených hodnot za pomoci dynamometru a počítačového softwaru. Proběhlo statistické zpracování naměřených hodnot a poté se výsledky porovnály u všech žárových nástřiků a použitých vyměnitelných břitových destiček.

Annotation of Master thesis

TENGLER, J. *Machining of Thermal Spraying in Terms of Aircraft Production: Master thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machining and Assembly, 2016, 76 p. Thesis head: Zlámal, T.

This master thesis deals with machining of thermal spraying abradable coating used in the aircraft production. In this thesis were tested two types of exchangeable cutting tips with various radii of the cutting edge curvature. There were chosen cutting parameters for the machining of abradable coatings, which were identical for all types of coatings and exchangeable cutting tips. During the machining process were measured cutting forces components for each exchangeable cutting tip and for each thermal spraying. Subsequently, it came to the evaluation of measured values with the help of dynamometer and computer software. There was conducted statistical processing of measured values and after that, the results of all thermal spraying and used exchangeable cutting tips were compared.

Obsah

Obsah.....	6
Seznam použitých značek a symbolů.....	8
Úvod.....	10
1. Teorie žárových nástřiků.....	11
1.1 Princip žárového nástřiku	12
1.2 Typy povlaků a jejich aplikace	14
1.3 Zdroje tepelné energie	18
1.4 Metody žárových nástřiků	19
1.5 Porovnání metod	24
2. Obrábění žárových nástřiků	25
2.1 Třískové obrábění žárových nástřiků.....	25
2.1.1 Volba vhodného řezného nástroje	26
2.1.2 Volba řezných parametrů	26
2.2 Ojehlování žárových nástřiků pomocí rotačních nástrojů	29
2.3 Broušení žárových nástřiků	30
2.4 Nekonenční obrábění vodním paprskem	32
2.5 Jiné postupy obrábění	33
3. Experimentální část práce	34
3.1 Použité žárově stříkané povlaky	34
3.2 Obrábění žárově stříkaného povlaku	38
3.2.1 Metody obrábění žárově stříkaného povlaku	38
3.2.2 Použitý obráběcí stroj	39
3.2.3 Použité řezné nástroje.....	39
3.2.4 Volba řezných podmínek.....	42
3.2.5 Měření složek řezných sil při obrábění	42
3.2.6 Schéma experimentální činnosti.....	46

4. Obrábění žárově stříkaných povrchů.....	47
4.1 Nastavení silových poměrů při obrábění	48
4.2 Vyhodnocení silových poměrů při obrábění.....	49
4.3 Statistické zpracování naměřených hodnot.....	60
Závěr.....	73
Poděkování.....	74
Použitá literatura.....	75

Seznam použitých značek a symbolů

<i>Značení</i>	<i>Vysvětlivka</i>	<i>Jednotka</i>
A_D	jmenovitý průřez třísky	$[\text{mm}^2]$
CNC	computer numeric control (počítačem řízený stroj)	[-]
D	průměr kruhové vyměnitelné břitové destičky	[mm]
E-BPVD	electron-beam physical vapour deposition	[-]
F	výsledná síla řezání	[N]
F_c	řezná složka síly	[N]
F_f	posuvová složka síly	[N]
F_p	pasivní složka síly	[N]
F_x	velikost složky síly v ose x	[N]
F_y	velikost složky síly v ose y	[N]
F_z	velikost složky síly v ose z	[N]
HRB	tvrdost podle Rockwella (ocelová kulička)	[-]
HRC	tvrdost podle Rockwella (diamantový kužel)	[-]
HV	tvrdost podle Vickerse	[-]
HVOF	vysokorychlostní nástřik plamenem	[-]
L	délka	[mm]
LPSS	nízkotlaký plazmový nástřik (Low Pressuer Plasma Spray)	[-]
R	řezný odpor	[N]
TBC	tepelné bariery (Thermal Barrier Coatings)	[-]
U	rozšířená nejistota	[~]

VBD	vyměnitelná břitová destička	[-]
VPS	vakuový plazmový nástřik (Vacuum Plasma Spray)	[-]
WC	karbid wolframu	[-]
a_p	hloubka řezu	[mm]
d	průměr	[mm]
f	posuv	[mm/min]
k_c	měrný řezný odpor	[N/mm ²]
k_U	koeficient rozšíření	[-]
n	počet měření	[-]
p	pravděpodobnost pokrytí	[%]
r_ε	poloměr zaoblení špičky	[mm]
s	šířka břitové destičky	[mm]
$s(x)$	výběrová směrodatná odchylka	[~]
u_A	standartní nejistota typu A	[~]
v_c	řezná rychlost	[m/min]
\bar{x}	výběrový průměr naměřených hodnot	[~]
κ_r	úhel nastavení hlavního ostří	[°]

Úvod

Obsahem diplomové práce je obrábění žárových nástřiků v podmínkách letecké výroby. V práci je popsána technologie žárových nástřiků, především se jedná o plazmový nástřik obrusitelných výsterek. Proběhlo obrábění testovacího mezikruží, který byl opatřen třemi různými obrusitelnými žárovými nástřiky, používaných v letecké výrobě.

Žárové nástřiky jsou velkou perspektivou pro technologie, které vytváří funkčně efektivní termální povlaky o tloušťce větší než 50 μm a používají se v mnoha odvětvích průmyslu. Tyto technologie jsou vhodné pro řadu použití a umožňují přizpůsobit povrch opatřeným žárovým nástřikem provozním podmínkám, což vede k prodloužení životnosti, zvýšení spolehlivosti a bezpečnosti součásti i k lepší ekonomice daného procesu [1].

Cílem práce bylo obrábění žárových obrusitelných nástřiků. Způsoby, kterými lze mechanicky opracovávat žárové nástřiky bylo spousta. Jednou z metod byla ruční metoda ojhlení žárového nástřiku, která má velkou výhodu, a to, že je schopná se přizpůsobit aktuálnímu stavu, ovšem není příliš přesná. Další metodou byla metoda strojní, u které je výhodou rychlost a přesnost obrábění. Při obrábění bylo důležité, aby se neodlamoval žárový nástřik z funkčních ploch, což při strojním obrábění soustružením se mohlo vyskytovat. Nejvhodnější způsob, jak lze provést ojhlení žárově stříkaných povlaků rychle, přesně a bez odpadávání velkých kusů bylo pomocí rotačního nástroje.

Během obrábění se měřily složky řezných sil, které byly naměřeny při obrábění žárových nástřiků na mezikruží. Použity byly různé druhy nástrojů, u kterých se porovnávaly pracovní podmínky, a bral se zřetel na možnost výskytu neshody při dané metodě. Dalším cílem pozorování byla vizuální kontrola obráběného mezikruží, a to zda nebyla odštípnutá hrana.

1. Teorie žárových nástřiků

Nanášení prvních povlaků metodou žárového nástřiku se začalo používat na začátku 20. století. První zmínku o metodě žárového nástřiku publikoval doktor Schoop, díky kterému se otevřel nový směr ve zpracování povrchu materiálů. Metody nanášení žárových nástřiků se nadále rozvíjí díky novým poznatkům, konstrukcím a aplikačním možnostem. Žárové nástřiky jsou rostoucím trendem v mnoha odvětvích průmyslu [1].

Rozvoj technologií žárového nástřiku a zvýšené požadavky na konstrukci a provozní spolehlivost v různých odvětvích průmyslu, zejména v leteckých turbínových motorech, vedly v posledním období k velkému využití žárových nástřiků na celou řadu dílů. Mezi nejvíce používané technologie povrchových úprav se využívá plazmového nástřiku a technologie vysokorychlostního nástřiku plamenem (HVOF), které se v provozu nejlépe osvědčily. Dnes si nelze představit novovýrobu a renovace dílů, především turbínových motorů novější generace (po roce 1970), bez technologie žárového nástřiku [6].

Technologie žárového nástřiku patří mezi postupně se rozvíjející technologie povrchových úprav, které pomáhají vytvářet povrchy se specifickými vlastnostmi. Vzhledem k jejich flexibilitě a technologickým možnostem postupně vytlačily klasické metody povrchových úprav, jako jsou galvanické procesy. Nyní patří žárově upravené povrchy mezi hlavní metody povrchových úprav pro novovýrobu i renovací spousty dílů používaných v průmyslu. Velkou výhodou jsou pro renovaci leteckých turbínových motorů, ale také draků letadel, zejména podvozkových částí [6].

Výhody žárově stříkaných povrchů [11]:

- ochrana před korozí,
- odolnost vůči opotřebení,
- regulace podbroušení – abraziva a abrazivní ucpávky,
- odolnost vůči žáru a oxidaci,
- tepelné bariéry,
- elektrický odpor a vodivost.

Mezi typické použití patří [11]:

- hřídele / ložiskové čepy čerpadel,
- těsnicí plochy,
- oběžná kola,
- skříně,
- konstrukce.

Technologie žárových nástřiků patří mezi úspornou alternativu aplikace metalických a keramických povlaků v méně náročném prostředí [11].

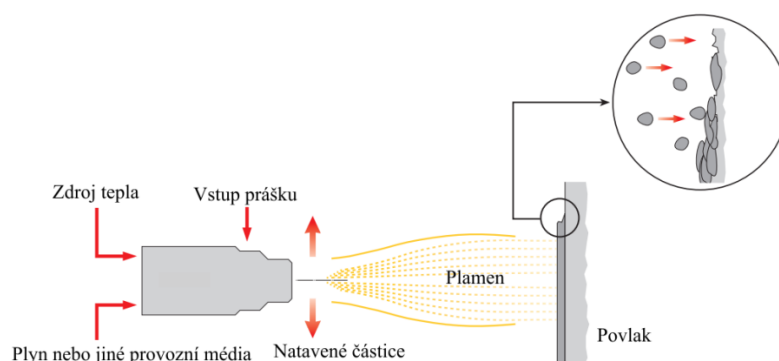
1.1 Princip žárového nástřiku

Žárově stříkané povlaky mají obvykle tloušťku od 50 μm do několika mm. Nanášení žárových nástřiků je částicový proces, kdy se povlak vytváří pomocí nanášeného materiálu. Nanášený materiál bývá nejčastěji ve formě prášku, ale může být přiváděn i ve formě drátu do zařízení, které nanášený materiál nataví a ve kterém dojde k urychlení natavených částic směrem k povlakované součásti. Při dopadu natavených částic na povrch dojde k plošnému rozprostření částic a k rychlému utuhnutí na povrchu. Tím se vytváří povlak s charakteristickou lamelární strukturou a specifickými vlastnostmi [2].



Obr. 1.1 proces žárového stříkání [7]

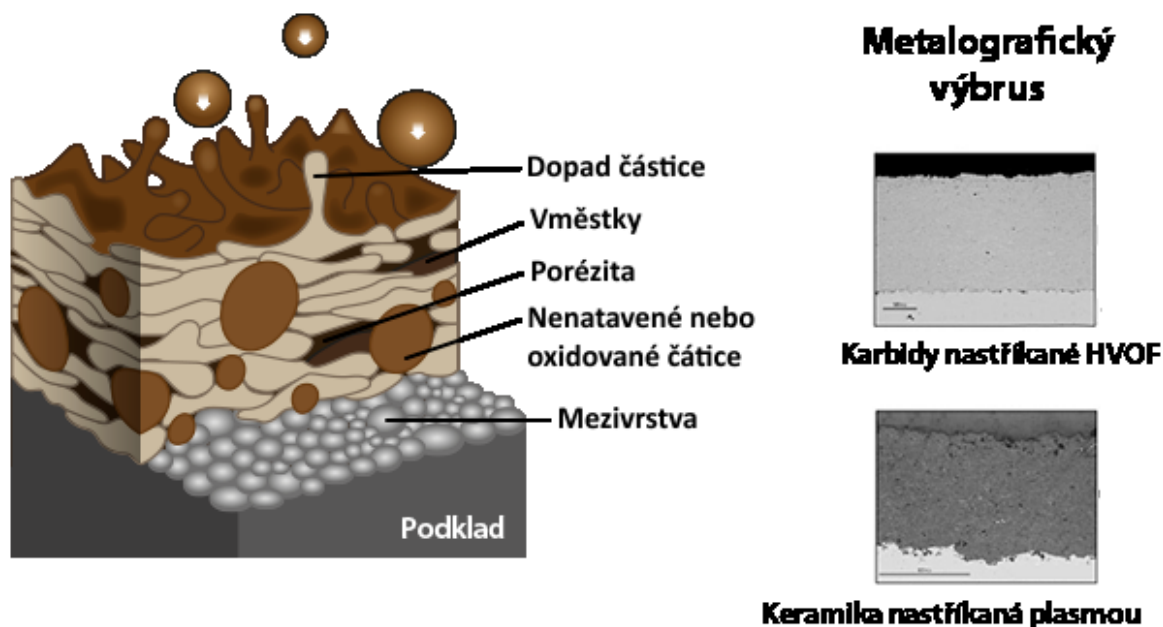
Na Obr. 1.2 je zobrazeno schéma, jak probíhá nanášení žárových nástřiků. Schéma je pouze orientační, jelikož existuje několik druhů metod, jak lze nanést natavený materiál na základní povrch.



Obr. 1.2 Princip žárových nástřiků [3]

Chemické složení materiálu, typ technologie stříkání, volba parametrů žárových nástřiků a s tím související struktura povlaku jsou základem pro vlastnosti žárově stříkaných povlaků [2].

Natavený materiál, který se nanáší na upravený, čistý povrch a s vysokou rychlostí, vytváří povrch, ve kterém se vyskytují zoxidované částice, nenatavené částice nebo taky póry (Obr. 1.3).



Obr. 1.3 Schématický diagram naneseného povlaku [7]

Přílnavost žárově stříkaných povlaků k substrátu i vzájemná koheze jednotlivých splatů je ovlivněna [1]:

- mechanickým zakotvením,
- meziatomovými vazbami,
- vznikem lokálních svarů,
- difuzí.

I přes relativně vyšší náklady na prvovýrobu má technologie žárově stříkaných povrchů ve srovnání s jinými technologiemi povrchových úprav dost výhod. Především zvyšují životnost, spolehlivost a funkčnost žárově stříkaných součástí [2].

1.2 Typy povlaků a jejich aplikace

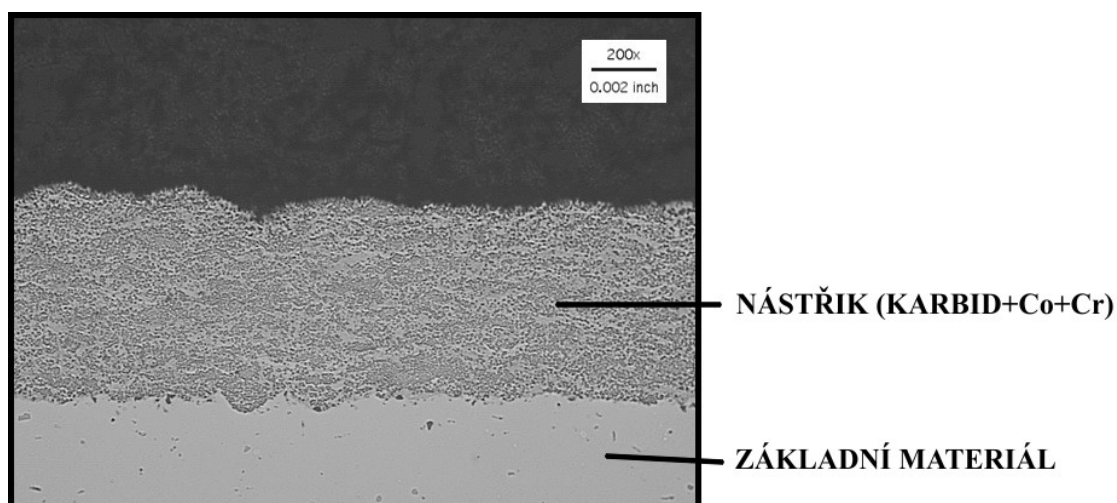
Žárově stříkané povlaky lze rozdělit do několik základních skupin podle jejich vlastností. Pro každou skupinu povlaku existují typické aplikace a použité technologie nástřiků bývá pro každou skupinu specifická. Stříkané vrstvy lze tedy rozdělit do následujících skupin [6].

Povlaky odolávající opotřebení

V poslední době se povlaky odolávající opotřebení uplatňují jako náhrady tvrdochromu a používají se pro renovaci úložných prostorů ložisek nebo se dají použít tam, kde je zapotřebí vysoká tvrdost povlaku a odolnost proti abrazi, erozi, adhezi i kavitaci. Tyto povlaky lze rozdělit na [6]:

- karbidické povlaky typu Cr_3C_2 – odolávají opotřebení při vysokých teplotách, které se pohybují nad $500\text{ }^\circ\text{C}$, používají se na vnější části spalovacích komor, vystavené kontaktnímu namáhání, popř. erozi, lze je aplikovat plazmou nebo HVOF,
- kovokeramické povlaky (cermety) typu WC-Co - odolávají opotřebení, vhodné pro nejrůznější pouzdra pro uložení ložisek na hřídelích rotorů, popř. hřídelí vrtulníkových reduktorů, vhodné pro nárazníky kompresorových lopatek atd., nástřik se provádí dnes již téměř výhradně technologií HVOF,
- keramické povlaky, nejčastěji Cr_2O_3 ,

- povlaky ze speciálních slitin na bázi vysokolegovaných ocelí, Ni a Co-slitin, které mají velmi široké použití a lze je nanášet plazmou, HVOF technologií i elektrickým obloukem.

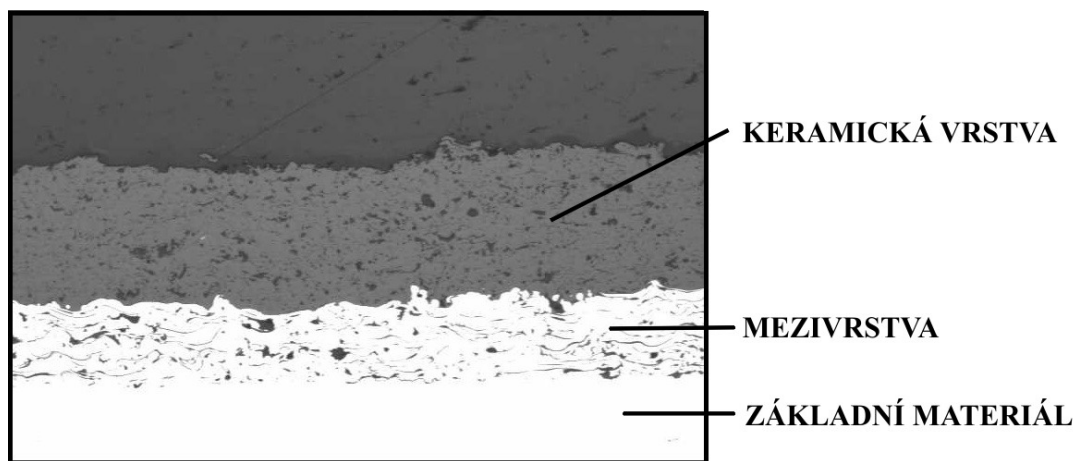


Obr. 1.4 Metalografický výbrus nástríku odolávajícímu opotřebení [10]

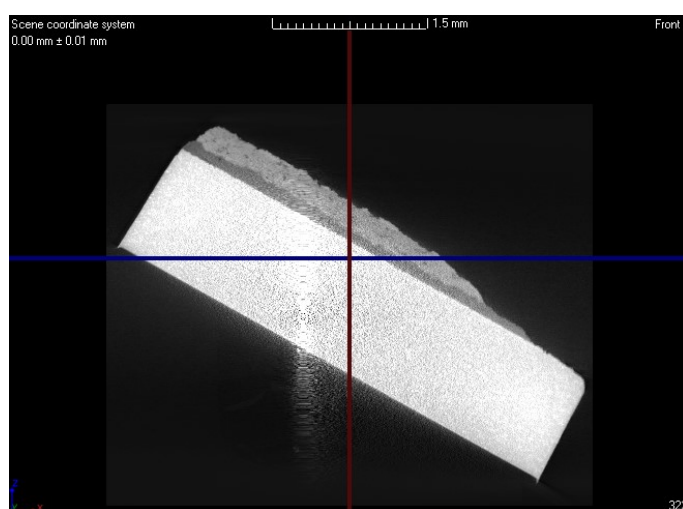
TBC nástrík (Thermal barrier coatings)

Jejich využití spočívá v nanášení materiálů s vysokou korozní odolností pro dané prostředí na materiál součástí s menší odolností, což sleduje ekonomické úspory (není nutno použít drahý materiál na celou součást), nebo další zvýšení funkčních parametrů, umožňující použití součástí za vyšších teplot. Do této skupiny patří tyto povlaky [6]:

- dvoustupňové povlaky typu TBC (thermal barrier coatings), složené z vazné vrstvy typu NiCrAlY, NiCoCrAlY, CoCrAlY pro zvýšení odolnosti proti vysokoteplotní korozi, které zajišťují výbornou přilnavost k substrátu, a keramické vrstvy $\text{ZrO}_2 + 8\% \text{Y}_2\text{O}_3$, které působí jako tepelné a difuzní bariéry - vhodné pro lopatky turbín, spalovací komory, plamence, difuzory, součásti výstupního systému, klapky trysek - tyto vrstvy se nanášejí výhradně plazmovým nástríkem,
- speciální slitiny na bázi Ni a Co zvyšující odolnost proti korozi v prostředí spalin s obsahem Na_2SO_4 a V_2O_5 - nástrík elektrickým obloukem, HVOF a plazmou,
- slitiny Cu a Al pro zvýšení odolnosti proti elektrochemické korozi (voda, mořská voda, chemická činidla) a atmosférické korozi, nástrík elektrickým obloukem a plazmou.



Obr. 1.5 Metalografický výbrus TBC nástřiku [9]

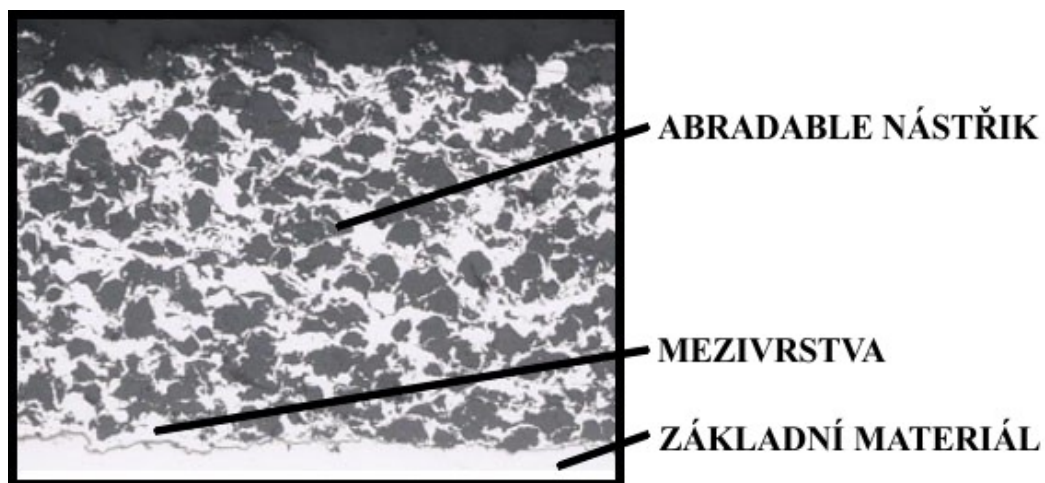


Obr. 1.6 Termální keramická bariéra

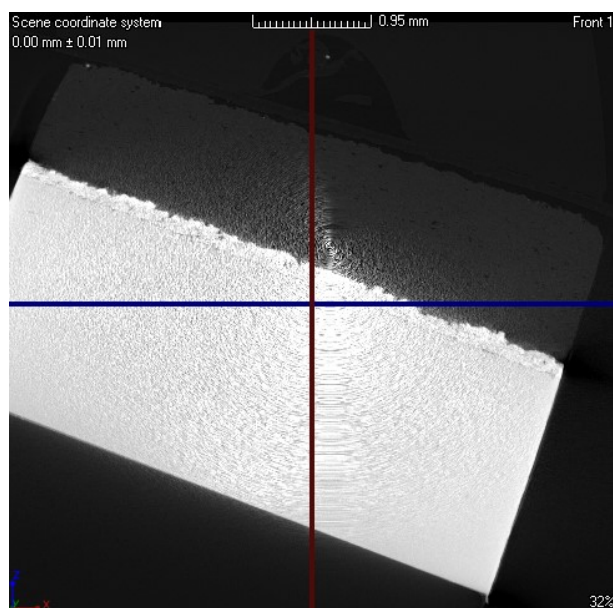
Těsnící povlaky

Těsnící povlaky slouží k utěsnění rotujících částí turbínových motorů, kompresorů, dmychadel, turbín a jiných rotačních zařízení, zvyšující termodynamickou účinnost motoru. Jedná se o tzv. obrusitelné výstelky (abradable). Do této skupiny patří [6]:

- obrusitelné nikl-grafitové výstelky do teplot 480 °C (výjimečně až 815 °C) pro použití na kompresorových částech (labyrinty),
- výstelky typu AlSi + polyester, popř. Al-bronz + polyester do 650 °C (kompresory),
- vysokoteplotní výstelky na bázi NiCoCrAlY + polyester + bornitrid do 700 °C pro utěsnění částí turbín.



Obr. 1.7 Metalografický výbrus abradable nástřiku [8]



Obr 1.8 Obrusitelný hliníkový nástřík – plazma

V leteckém průmyslu došlo v poslední době k využití žárového nástřiku k určitému posunu a změnám, které posunuly technický vývoj v oblasti turbinových motorů. Zároveň došlo k nárůstu celkového počtu aplikací. Výrazně se prosazují zejména následující trendy [6]:

- téměř úplné nahrazení technologií VPS a LPPS (vakuový plazmový nástřík) pro vytváření TBC vrstev na listech pracovních a rozváděcích lopatek turbin technologií E-BPVD,
- prudký rozvoj technologie vysokorychlostního nástřiku HVOF a jeho využití pro nástřík cermetů na bázi karbidů ($WC-Co$, Cr_3C_2-NiCr), kde lze dosáhnout lepších vlastností než u plazmy - v oblasti všeobecného strojírenství tato

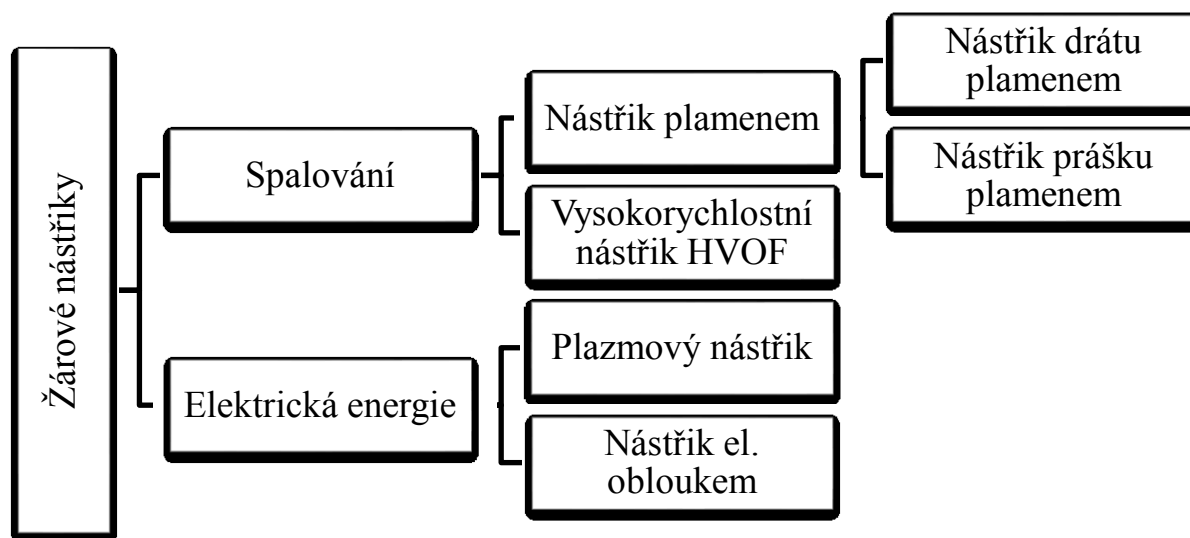
technologie již zcela vytlačila u nástřiku tohoto typu materiálů plazmový nástřik, v leteckém průmyslu postupuje náhrada z důvodu určitého konzervativismu pomaleji,

- renesance nástřiku elektrickým obloukem a zvýšené využití této technologie tam, kde není bezpodmínečně nutné použít plazmu a HVOF, což přináší výrazné finanční úspory.

V diplomové práci byl použit pouze jeden druh žárového nástřiku. Jednalo se o obrusitelné žárové nástřiky, které se používají do nerotačních zařízení. Jejich úkolem je těsnit a vymezit prostor mezi rotujícími lopatkami a pláštěm. Při prvním záběhu si lopatky do povlaku samy vybrousí drážky, ve kterých poté rotují.

1.3 Zdroje tepelné energie

K natavení přídavného materiálu je zapotřebí mu dodat tepelnou energii. U žárových nástřiků se používá spalování přídavného materiálu, nebo roztavení pomocí elektrické energie. Krátké rozdělení je zobrazeno na Obr. 1.9.



Obr. 1.9 Rozdělení žárových nástřiků

1.4 Metody žárových nástřiků

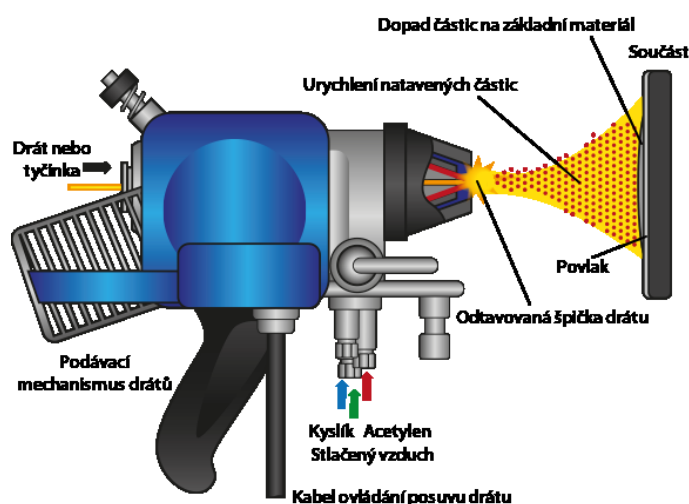
Nástřik plamenem

Žárově stříkané povlaky aplikované plamenovým nástřikem patří do širší skupiny procesů povlakování. Používá se celá řada různých materiálů, které vytvářejí konečný povlak. Metoda nástřiku povlaku plamenem nabízí cenově úspornější variantu aplikace metalických a keramických povlaků v méně náročném prostředí. Nástřik plamenem funguje na principu využívání tepla vzniklého spalováním plynného paliva. Obvykle hořlavým plynem bývá směs kyslíku a acetylenu nebo propanu. Vzniklý plamen taví povlakový materiál. Během procesu je zahřívána tavenina, obvykle prášek nebo drát, a vháněna na podklad, kde vytváří povlak [11].

Metoda nástřiku plamenem bývá velmi rozšířena v případech, kdy je vyžadováno nenákladné povlakování a lze tolerovat nižší kvalitu. Většina komponent se nástříká manuálně a metoda se používá na [11]:

- hřídele opotřebené v rámci reklamace, zejména v oblastech ložisek u materiálů, jako jsou nerezové oceli nebo slitiny bronzu.

Vytvořené povlaky jsou porézní a do povlaku tak mohou být absorbována maziva, čímž se zlepšuje výkon ložisek [11].



Obr. 1.10 Žárový nástřik plamenem [7]

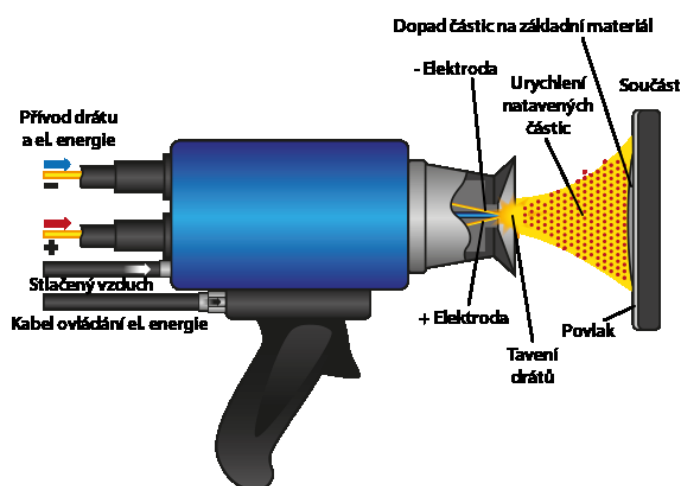


Obr. 1.11 Žárový nástřik plamenem [13]

Nástřik elektrickým obloukem

Nástřik elektrickým obloukem se aplikuje tak, že do nástřikové pistole bývá přiváděn přídatný materiál ve formě drátu, který se taví vzniklým elektrickým obloukem. Pomocí proudu tlakového vzduchu se roztavený materiál urychluje a rozprašuje na připravený povrch strojního dílu. Přídatný materiál ve formě drátu může být stejného nebo různého složení. Použitím dusíku nebo argonu jako rozprašovacího plynu lze omezit oxidaci takto nastříkané vrstvy. Další výhodou je možnost stříkání větších tloušťek povlaku. Metoda se využívá především pro renovace strojních součástí [4].

Pro tuto technologii jsou výhodami její nízké provozní náklady, jednoduchost a nízká cena [6].



Obr. 1.12 Žárový nástřik el. obloukem [7]



Obr. 1.13 Žárový nástřik el. obloukem [4]

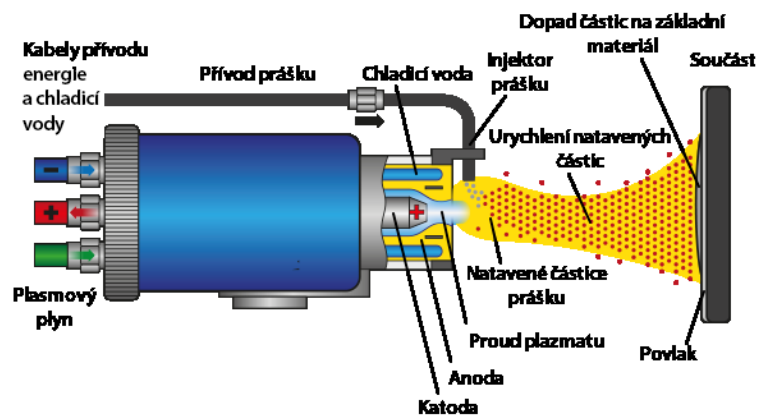
Plazmový nástřik

Plazmový nástřik patří mezi univerzální technologie vytváření povrchových vrstev pomocí žárového nanášení. Princip metody je založen na hoření elektrického oblouku mezi wolframovou katodou a válcovou měděnou anodou tvořící trysku. Elektrický oblouk hoří v plazmovém plynu, který je přiváděn do hořáku. Z hořáku vystupuje plazma s vysokou teplotou (12000 – 16000 °C). Do hořáku se pomocí nosného plynu přivádí přídavný materiál ve formě prášku. Prostřednictvím plazmových nástřiků lze aplikovat různé typy materiálů. Výhodou plazmového nástřiku je možnost aplikování keramických povlaků. Nevýhodou plazmového nástřiku je malá soudržnost povlaku se základním materiálem a větší pórovitost. Mezi výhody této technologie patří její flexibilita a výborné výsledné vlastnosti povlaků. Velkou výhodou pro tyto technologie je malé tepelné ovlivnění substrátu. Její nevýhodou je značná technologická náročnost a vysoká cena [4, 6].

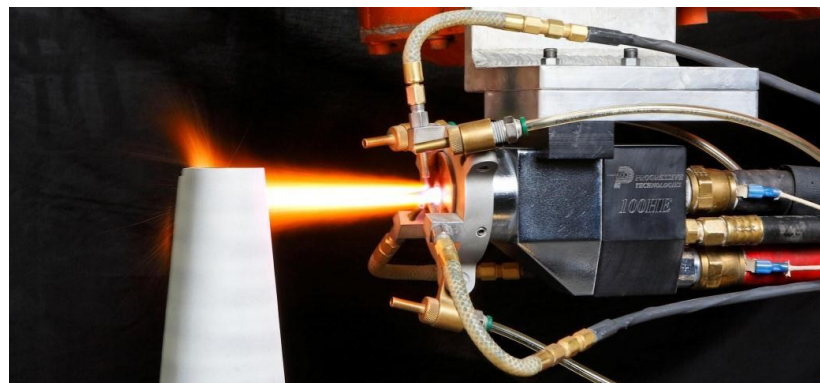
Díky své univerzálnosti a mimořádným vlastnostem bývá proces využívající plazmatu používán celou řadou technologií povlakování jako proces, který poskytuje nejširší výběr povlakových materiálů. Využití materiálu při plazmovém nástřiku [11]:

- opotřebení otěrem, nástřik karbidu wolframu / kobaltové drážky pro těsnicí pístní kroužky - plynové turbíny,
- ochrana vůči vysoké teplotě, povlaky jako tepelná clona (TBC) spalovacích prvků plynových turbín,
- odolnost vůči opotřebení, nástřik keramiky oxidu chromitého na tiskařské válce pro laserový tisk,

- odolnost vůči opotřebení otěrem, nástřik slitin s molybdenem na pístní kroužky průmyslových naftových motorů,
- odolnost vůči erozi / abrazi - podzemní nástroje - těžba ropy a zemního plynu.



Obr. 1.14 Schéma nanášení plazmového nástřiku [7]

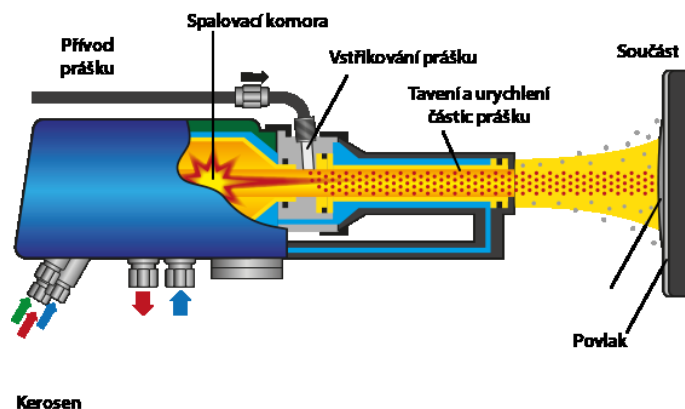


Obr. 1.15 Nanášení plazmového nástřiků [4]

Vysokorychlostní nástřik HVOF

Vysokorychlostní nástřik (HVOF) je novou variantou pro nanášení žárových nástřiků. Je založena na speciální konstrukci hořáku, ve kterém spaliny na konci trysky prudce expandují, a tím dochází k jejich dramatickému urychlení. Teplot, které jsou nutné k dosažení natavení přídavného materiálu, je dosahováno spalováním. Hlavními výhodami vysokorychlostního nástřiku stříkaných povlaků je nízká pórovitost (<1 %), vysoká přilnavost (>70 MPa), nízký obsah oxidů (<1 %) i při nástřiku reaktivních kovů. Unikátní vlastností této technologie je, že při vhodné volbě depozičních parametrů poskytuje povlaky v tlakovém pnutí, což umožňuje vytvářet povlaky velkých tloušťek. Tlakové pnutí v povlaku je rovněž příznivé z hlediska únavových vlastností povlakovaných součástí. K výhodám nástřiku HVOF technologií patří nepřevýšení teploty

180 °C u součástí během procesu nástřiku, což je hluboko pod fázovými přeměnami ocelí, které jsou pro výrobu součástí opatřovaných nástřikem žárovými technologiemi ve většině případů používány. Nízká hodnota tepelného ovlivnění součástí rovněž zabraňuje vzniku nežádoucích pnutí a tvarových deformací spojených s teplotními gradienty. Uvedené vlastnosti předurčují tyto povlaky pro nejnáročnější aplikace. Přednostmi jsou lepší vlastnosti kovů a karbidů než u plazmového nástřiku a vyšší produktivita. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena [1, 6].



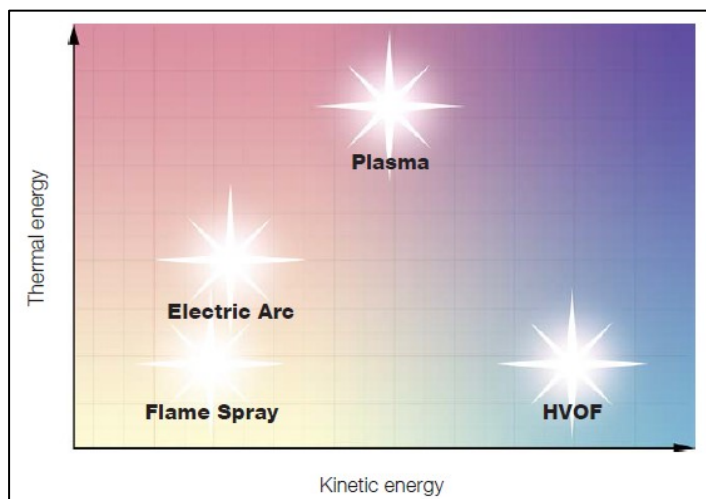
Obr. 1.16 Žárový nástřik HVOF [7]



Obr. 1.17 Žárový nástřik HVOF [4]

1.5 Porovnání metod

Procesy žárových nástřiků se zásadně liší v tepelných a kinetických energiích, při kterých dochází k rozstřikování částic. Tepelná energie je určena dosažením teploty plamene a kinetická energie je určena rychlostí rozstřikování částic. Energetické srovnání stříkacích procesů je znázorněno na Obr. 1.18 [3].



Obr. 1.18 Porovnání metod žárových nástřiků [3]

Vysoká teplota plazmového stříkání je zvláště vhodná pro materiály s vysokou teplotou tavení, jako je například keramika. Proces HVOF, který má vysokou kinetickou energii a poměrně nízkou tepelnou energii, vede k pozitivním účinkům povlaku a je vhodná pro nástřikové hmoty jako karbid, wolfram. Srovnávání procesů je z velké části v souvislosti s nanášenými povlaky [3].

Tab. 1.1 Základní parametry nástřiků [3]

Proces	Teplota zdroje [°C]	Rychlost dopadu [m/s]	Pórovitost [%]
Plamen	3000	≤ 50	3 - 10
El. Oblouk	4000	≈ 150	3 - 10
Plazma	12000 - 16000	≤ 450	1 - 5
HVOF	2600 - 3000	≤ 700	< 2

2. Obrábění žárových nástřiků

Správná funkčnost žárově stříkaných součástí v rozhodující míře závisí na správném výběru technologických postupů dodatečných úprav a konečné úpravě po nástřiku. Během mechanického opracování a úpravách žárově stříkaného povlaku je nezbytné vzít v úvahu zejména vlastnosti lamelární struktury. Lamelární struktura se značně liší od stejného materiálu v litém nebo tvářeném stavu. Postupy konečných úprav, které mohou být vhodné pro lité nebo tvářené materiály, by žárově stříkané povlaky pravděpodobně poškodily. Ze zmíněných důvodů nelze u žárově stříkaných povlaků vzhledem k jejich odlišným vlastnostem použít společné základy postupu třískového obrábění. V žárově stříkaných povlacích se vyskytuje řada různých tvrdých fází, např. oxidy, karbidy, boridy, silicidy a další. To vyžaduje věnovat specifickou pozornost při volbě geometrie ostří, aby se předešlo opotřebení nástroje [12].

2.1 Třískové obrábění žárových nástřiků

Jestli lze žárově stříkaný kovový povlak soustružit závisí na specifických vlastnostech žárově stříkaného povlaku, na jeho struktuře a tvrdosti, a také na postupu aplikace žárového stříkání. Soustružením je nutno nejdříve odebrat hrubou povrchovou vrstvu. Jelikož jsou žárové nástřiky velmi tvrdé a houževnaté materiály, je důležité správně volit řezné parametry obrábění a řeznou geometrii nástroje, aby se předešlo jeho opotřebení a dosáhlo tak požadovaného obráběného povrchu součásti [12].

V některých případech lze žárově stříkané povlaky obrábět i frézováním. Při výběru nástroje, volbě posuvu a rychlosti se musí vzít v úvahu stejná hlediska jako u soustružení [12].

Při obrábění povlaků z natavitelných slitin, které byly pro získání hutné struktury přetaveny, lze použít řeznou kapalinu, aby se zabránilo jejich přehřátí. Naproti tomu chlazení se nesmí použít při obrábění povlaků ve stavu po nástřikání. Mikroskopické póry v povlaku umožňují pronikání řezné kapaliny, což způsobuje odbarvení a jiné problémy. Při použití řezné kapaliny může v oblastech s vysokým hydraulickým tlakem dojít k úplnému nebo částečnému odstranění částic, což vede ke vzniku špatné povrchové úpravy [12].

2.1.1 Volba vhodného řezného nástroje

Při volbě vhodného řezného nástroje se musí brát zřetel na to, že důsledkem výskytu tvrdých fází v žárově stříkaných kovových povlacích a extrémního zpevnění některých nanášených částic je soustružnický nůž mnohem více zatížen, než je tomu při obrábění litého nebo kovaného materiálu stejného nebo podobného složení. Z důvodu velkého zatížení řezného nástroje je nezbytné použít slinuté karbidy (tvrdokovy) a keramické řezné materiály. Tyto materiály se obvykle používají k soustružení šedé litiny, tvrzené litiny a temperované litiny s krátkými třískami. Naproti tomu žárově stříkané povlaky hliníku nebo mědi lze hospodárně soustružit nástroji z rychlořezné oceli. Dobrých časů obrábění lze dosáhnout použitím slinutých karbidů jakosti K01 a K10 podle ISO 504. Žárově stříkané povlaky o tvrdostech $X > 700 \text{ HV}$ (60 HRC) umožňují přijatelné soustružení nástroji z polykrystalického kubického nitridu bóru, slinutého na tělese ze slinutého karbidu [12].

2.1.2 Volba řezných parametrů

- **Řezná rychlost**

Optimální řezné rychlosti pro žárově stříkané povlaky bývají různé. Vzhledem k výskytu tvrdých fází jsou nižší než u homogenního materiálu a vyžadují ostré řezné nástroje s poloměrem řezné hrany r 0,4 mm až 1,2 mm. Tab. 2.1 až Tab. 2.4 uvádějí přibližné hodnoty, které lze upravit podle konkrétního případu. Aby se zabránilo nepříznivým výsledkům, doporučuje se provést zkušební řez. Při použití nadměrných řezných rychlostí se žárově stříkaný povlak chová jako lapovací nástroj, což vede k nehospodárnému zkrácení životnosti řezného nástroje. Tupý řezný nástroj způsobuje velké povrchové zatížení a může způsobit poškození povlaku [12].

- **Posuv**

Příčný posuv na jednu otáčku musí řadově odpovídat průměru částic žárově stříkaného povlaku. Tab. 2.1 až Tab. 2.4 uvádějí přibližné hodnoty pro soustružení žárově stříkaných povlaků, které lze upravit podle konkrétního případu [12].

Tab. 2.1 Třískové obrábění žárově stříkaných povlaků (nepřetavených) noži ze slinutých karbidů [12]

Tvrdost povlaku X	Jakost slinutého karbidu	Úhel řezu	Úhel hřbetu nože	Řezná rychlost (m/min)	Posuv (mm/otáčka)		Hloubka řezu (mm)		Chlazení
					obrábění na hrubo	obrábění na čisto	obrábění na hrubo	obrábění na čisto	
$X < 200 \text{ HV}$	K10	+8° až 10°	5°	do 70	0,2	0,05 až 0,08	0,5	0,05	ne
$200 \text{ HV} \leq X < 300 \text{ HV}$ (30 HRC)	K10	+5°	5°	do 50	0,1 až 0,2	0,05 až 0,08	0,5	0,05	ne
$300 \text{ HV (30 HRC)} \leq X < 700 \text{ HV (60 HRC)}$	K01	-5°	5°	do 30	0,1 až 0,2	0,05 až 0,08	0,5	0,05	ne

Tab. 2.2 Třískové obrábění žárově stříkaných povlaků (přetavených) noži ze slinutých karbidů [12]

Tvrdost povlaku X	Jakost slinutého karbidu	Úhel řezu	Úhel hřbetu nože	Řezná rychlost (m/min)	Posuv (mm/otáčka)		Hloubka řezu (mm)		Chlazení
					obrábění na hrubo	obrábění na čisto	obrábění na hrubo	obrábění na čisto	
$X < 200 \text{ HV}$	K10	+5°	5°	do 50	0,1 až 0,2	0,05 až 0,08	0,5	0,05	ano
$200 \text{ HV} \leq X < 300 \text{ HV}$ (30 HRC)	K01	-5°	5°	do 30	0,1 až 0,2	0,05 až 0,08	0,5	0,05	ano
$300 \text{ HV (30 HRC)} \leq X < 700 \text{ HV (60 HRC)}$	K01	-5°	5°	do 20	0,1 až 0,2	0,05 až 0,08	0,5	0,05	ne

Tab. 2.3 Třískové obrábění žárově stříkaných povlaků (nepřetavených) noži z kubického nitridu bóru [12]

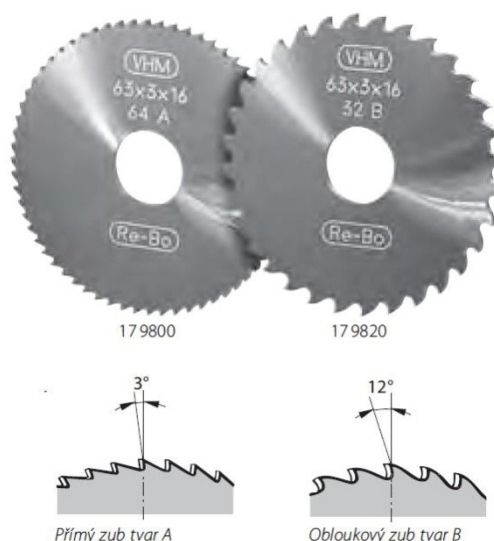
Tvrdost povlaku X	Úhel řezu	Úhel hřbetu nože	Řezná rychlost (m/min)	Posuv (mm/otáčka)		Hloubka řezu (mm)		Chlazení
				obrábění na hrubo	obrábění na čisto	obrábění na hrubo	obrábění na čisto	
X < 350 HV (35 HRC)	+5°	5°	do 160	do 0,1	do 0,05	0,5	0,05	ne

Tab. 2.4 Třískové obrábění žárově stříkaných povlaků (přetavených) noži z kubického nitridu bóru [12]

Tvrdost povlaku X	Úhel řezu	Úhel hřbetu nože	Řezná rychlost (m/min)	Posuv (mm/otáčka)		Hloubka řezu (mm)		Chlazení
				obrábění na hrubo	obrábění na čisto	obrábění na hrubo	obrábění na čisto	
500 HV (50 HRC) ≤ X < 700 HV (60 HRC)	-5°	5°	100 až 160	do 0,1	do 0,08	0,3	0,05	ano
X ≥ 700 HV (60 HRC)	-5°	5°	do 80	do 0,1	do 0,08	0,3	0,05	ano

2.2 Ojehlování žárových nástřiků pomocí rotačních nástrojů

K ojehlení nástřiků pomocí rotačních nástrojů z tvrdokovu mohou být použity pilové kotouče od německé firmy Re-Bo. Používány mohou být typy pilových kotoučů s označením normou DIN 1837 *A* a DIN 1838 *B*. Pilový kotouč DIN 1837 *A* má jemné ozubení s úhlovými zuby tvaru *A* s kladným úhlem hřbetu (3°) a je vhodný pro obrábění tenkostěnných obrobků a pro malé hloubky řezu. Kotouč s označením DIN 1838 *B* má oproti pilovému kotouči typu *A* hrubé ozubení s úhlovými zuby typu *B*, které lze porovnat na Obr. 2.1. Pilové kotouče s ozubením typu *B*, které mají také kladný úhel hřbetu (12°), jsou vhodné pro obrábění větších průřezů a větší hloubky řezu. Pilový kotouč typu *B* lze díky lepší tvorbě třísek a většímu třískovému prostoru používat univerzálněji než verzi s jemným ozubením [16].



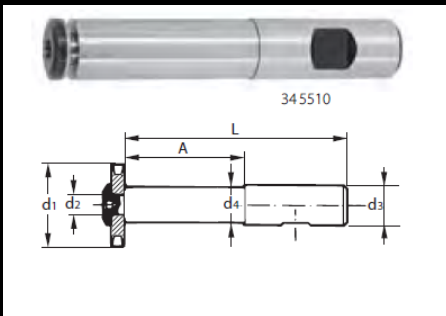
Obr. 2.1 Pilové kotouče s tvarem zubu typu *A*, *B* [16]

Tab. 2.5 Rozměry pilových kotoučů Re-Bo [16]

Ø x tloušťka	Pilový kotouč		Ø otvoru	Počet zubů	
mm			mm	Typ A	Typ B
25 x 1,2	DIN 1837 A jemný	DIN 1838 B hrubý	8	50	24

Představené pilové kotouče bývají upnuty do stroje za pomoci upínací stopky od firmy Horex.

Tab. 2.6 Upínací stopka pilových kotoučů [16]

	Ø pilového kotouče d_1	mm	25
	A / L	mm	50 / 100
	Ø d_2	mm	8
	Ø d_3	mm	10
	Ø d_4	mm	13

2.3 Broušení žárových nástřiků

Nejvhodnější metodou pro finální úpravu supertvrdých žárově stříkaných povlaků se jeví technologie broušení. Broušení doporučují jak samotní výrobci nástřiku, tak technologové, kteří s danou problematikou setkávají v praxi. Při špatné obrobitelnosti žárových nástřiků, je technologie broušení upřednostňována před třískovými metodami obrábění, a to hlavně díky menšímu namáhání žárově stříkaného povlaku než je to např. u soustružení a frézování. Metoda broušení žárově stříkaných povlaků je vhodná, hospodárná metoda obrábění mnohabřitým nástrojem s geometricky nedefinovatelnými řeznými hranami, kterými jsou zrna brusiva spojena pojivem. Broušením lze dosáhnout velmi kvalitního povrchu a velké geometrické přesnosti tvaru i rozměrů. Lze jím ubírat pouze menší množství materiálu, a proto je používáno převážně pro závěrečné dokončovací práce [12].

Je nutno dávat přednost broušení za mokra před broušením za sucha, aby se zabránilo přehřátí žárově stříkaného povlaku i zpracovaného předmětu. Je výhodné povlak před broušením utěsnit. Tím se předejde pronikání řezné kapaliny na rozhraní s podkladem, což by mohlo způsobit korozní problémy. Tím se také minimalizuje vznik úlomků při broušení, které mohou znečistit vratnou řeznou kapalinu. Utěsňování před broušením se dává přednost i u keramických povlaků, aby se předešlo vzniku nevzhledných skvrn, způsobených vníkaním řezné kapaliny do povlaku [12].

Brousit lze všechny žárově stříkané povlaky kromě obrusitelných (abradable) žárových nástřiků. Je to z toho důvodu, že by mohly zrna z brusného kotouče zůstat v nástřiku, a tyto

zrna by pak mohli poškodit lopatky, které se do nástřiku zařezávají. Zcela by to obrátilo podstatu obrusitelného nástřiku. Namáhání žárově stříkaných povlaků při broušení je nižší, než při soustružení. Podrobnosti o broušení jsou uvedeny v Tab. 2.7 a Tab. 2.8 [12].

Výběr brusného kotouče

Tvar brusného kotouče bude různý podle geometrie broušené součásti. Lze brousit za sucha, ačkoli se dává přednost použití řezné kapaliny, pokud je to možné. V Tab. 2.7 až Tab. 2.9 jsou uvedeny používané typy kotoučů, které budou záviset na použitém žárově stříkaném materiálu. Jestliže se vyžaduje hladký povrch a přesnost rozměrů není důležitá, lze použít pásové broušení. K tomuto účelu se obvykle používají např. pásy s karbidem křemíku nebo s diamanty [12].

Tab. 2.7 Broušení žárově stříkaných povlaků (nepřetavených) kotouči s karbidem křemíku a s korundem [12]

Materiál povlaku	Tvrdost povlaku	Metoda broušení	Brusivo	Obvodová rychlost (m/min)	Chlazení
Slitina Ni/Cr		Broušení vnějších válcových ploch	89A	25 až 30	A
		Broušení rovinných ploch	80A	20 až 25	n
		Broušení vnitřních ploch	80A	15 až 20	o
Slitina Cu/Al		Broušení vnějších válcových ploch	1C	25 až 30	A
		Broušení rovinných ploch	1C	20 až 25	n
		Broušení vnitřních ploch	1C	15 až 20	o
Keram. slitina	X > 700 HV	Broušení vnějších válcových ploch	5C	25 až 30	A n o

Tab. 2.8 Broušení žárově stříkaných povlaků (přetavených) kotouči s karbidem křemíku a s korundem [12]

Materiál povlaku	Tvrdost povlaku (HRC)	Metoda broušení	Brusivo	Obvodová rychlost (m/min)	Chlazení
Slitina Ni/Cr	35 až 45	Broušení vnějších válcových ploch	C	25 až 30	Ano
		Broušení rovinných ploch	C	20 až 25	
		Broušení vnitřních ploch	C	15 až 20	
Slitina Ni/Cr	45 až 60	Broušení vnějších válcových ploch	C	25 až 30	Ano
		Broušení rovinných ploch	C	20 až 25	
		Broušení vnitřních ploch	C	15 až 20	
Keram. slitina	> 60	Broušení vnějších válcových ploch	C	18 až 25	Ano
		Broušení rovinných ploch	C	18 až 25	
		Broušení vnitřních ploch	C	15 až 20	

Tab. 2.9 Broušení vnějších válcových ploch s žárově stříkanými povlaky (natavenými a keramickými) pomocí diamantových kotoučů [12]

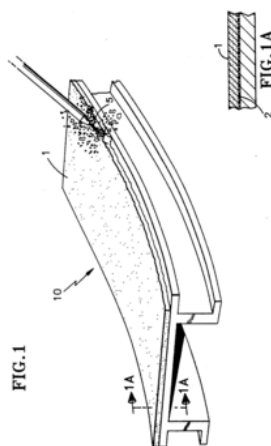
Materiál povlaku	Tvrdost povlaku (HRC)	Za mokra	Za sucha	Pojivo syntetická pryskyřice-Obvodová rychlost (m/min)	Pojivo kovové-Obvodová rychlost (m/min)
Slitina WC/NiCr	60 až 75	Ne Ano	Ano Ne	8 až 16 18 až 22	8 až 12 12 až 28
Keramická slitina		Ano	Ne	18 až 22	12 až 28

2.4 Nekonvenční obrábění vodním paprskem

Během údržby motorů a jiných podobných součástí, kde jsou použity žárově stříkané povlaky, musí být povlaky často odstraněny. U různých metod odstranění povlaků, jako jsou soustružení, frézování, broušení, vznikají vady během odstranění, ať už to jsou odštípnuté hrany nebo zničení dané součásti. Jednou z nekonvenčních metod, jak lze odstranit žárový povlak, může být obrábění vodním paprskem [19].

Jedná se o jednoduchou metodu odstranění povlaku, která je nákladově efektivní a bezpečná pro životní prostředí. Princip odstranění povlaku vodním paprskem je založen

na kapalném procesu vodního paprsku. Proud kapaliny stříká pod úhlem na povlak, čímž se tlakem odstraňuje. Odstraňuje se v závislosti na tlaku proudu kapaliny bez jakéhokoliv poškození součásti, na které byl povlak nanesen. Kritické parametry zahrnují vzdálenost trysky od povlaků a tlak kapaliny (2000 – 3000 psi). V závislosti zařízení a tlakových omezení tryska může být umístěna do vzdálenosti přibližně 152 mm až dokonce 304 mm od povrchu povlaku. Jsou však výhodnější menší vzdálenosti, volí se obvykle 100 mm. Úhel mezi proudem vody a povrchem povlaku bývá obvykle 45°, může se zvolit úhel i mezi 30° - 90°. Proud vody se může skládat z jakékoliv kapaliny, která má viskozitu v rozmezí 0,25 – 5 cP při teplotě 25 °C [19].



Obr. 2.2 Odstranění povlaku vodním paprskem [19]

2.5 Jiné postupy obrábění

- třískové obrábění s geometricky určenými hranami nástroje (vrtání),
- hoblování, řezání pilou, vystružování, protahování,
- třískové obrábění s geometricky neurčenými, ale tvrdými hranami nástroje,
- kuličkování,
- kartáčování.

3. Experimentální část práce

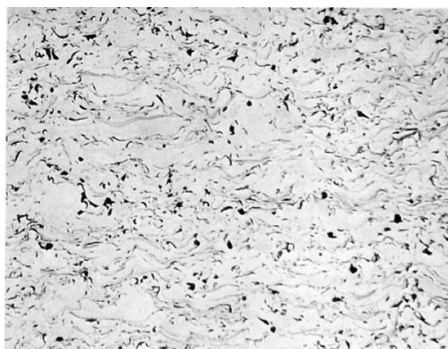
V experimentální části diplomové práce bylo řešeno obrábění žárově stříkaného povlaku. Žárový nástřik byl vytvořen na testovacím mezikruží a bylo třeba jej soustružit. Nástřik bylo třeba soustružit pomocí různých nástrojů. Testovalo se na třech mezikruzích, které byly opatřeny každé jiným žárovým nástřikem a zkoušely se různé varianty vyměnitelných břitových destiček s různým zaoblením špičky a průměrem. Velkou roli během obrábění hrála geometrie řezného nástroje.

3.1 Použité žárově stříkané povlaky

Pro dané testovací mezikruží byly použity různé abradable nástřiky, které měly různé chemické složení. Jednalo se především o povlaky s vyšší pórovitostí. Povlaky nanesené na testovacím mezikruží plní těsnicí funkci. Zvolené abradable nástřiky byly aplikovány plazmovým nástřikem.

Podkladová vrstva nástřiku Metco 480NS

Metco 480 NS je legovaný nikl – hliníkový prášek, který je určený k žárovému stříkání. Plní funkci podkladové vrstvy, na kterou se nanáší finální žárový nástřik. Žárové nástřiky Metco 480 NS mají dobrou integritu povrchu, vysokou hustotu a dobrou odolnost vůči oxidaci. Nástřik Metco 480 NS obsahuje 4,5 % hliníku a 95,5 % niklu. Nástřik se nanáší na otrýskaný čistý povrch. Povlak dobře přilne k různým materiálům, jako je mosaz, nerezová ocel, titan a slitiny hliníku. Plazmový žárový nástřik podkladového materiálu Metco 480 NS se nanáší argon – vodíkovým plazmatem. Makrotvrdost u nástřiku Metco 480 NS je až HRB 80 a pórovitost bývá menší než 0,25 % [14].



Obr. 3.1 Metco 480 NS – plazma [14]

Žárový nástřík Metco 601 NS

Žárový nástřík je ve formě prášku, který má složení z Al, 7 % křemíku a 40 % polyesteru. Povlaky s použitím těchto práškových materiálů se nejlépe uplatní použitím technologie atmosférického nástříku plazmou. Nástřík Metco 601 NS se používá jako abradable žárový nástřík, kdy rotační složka může dojít do styku s povlakem. Povlaky jsou navrženy tak, aby se minimalizovalo opotřebení rotujících součástí, a zároveň maximalizuje efektivitu naneseného povlaku tak, že poskytuje kontrolu vůle v oblasti těsnění. Žárový nástřík Metco 601 NS, jako otěrový nástřík, má velmi dobré vlastnosti. Poskytuje optimální rovnováhu mezi požadovanými vlastnostmi obrusitelnosti a odolnost proti erozi a tvrdosti [14].

Aplikace Metco 601 NS je dobrou variantou pro letecký a automobilový průmysl [14]:

- letecké turbomotory nízkého tlaku kompresoru,
- automobilový průmysl a průmyslové turbodmýchadla.

Tab. 3.1 Žárový nástřík Metco 601 NS [14]

Klasifikace	Obrusný povlak
Chemické složení	Al; Si 7 %; polyester 40 %
Hustota	$\approx 0,9 \text{ g / cm}^3$
Provozní teplota	$\leq 325 - 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Teplota tání	$577 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Technologie nanášení	Nástřík plazmou
Aplikovaná tloušťka nástříků	2 – 2,5 mm



Obr. 3.2 Žárový nástřík Metco 601 NS

Žárový nástřík Metco 2042

Žárový nástřík Metco 2042 je patentovaný CoNiCrAlY + nitrid boritý / polyesterový prášek. Je navržen jako ohrusitelný žárový nástřík s póry. Ohrusitelný povlak se aplikuje plazmovým nástříkem, který může být použit v systémech turbíny a jiných točivých zařízeních. Maximální provozní teplota povlaku je 650 °C. Povlak Metco 2042 je složen z kobaltu, niklu, chromu, hliníku, yttria a je přidáván nitrid boritý s polyesterem. Povlak poskytuje oxidační vlastnosti a odolnost proti korozi ve srovnání s ostatními strukturami na bázi niklu a chromu. Technologie rozprašování plazmou tohoto prášku nabízí spolehlivost procesu a nízké povrchové profily, aniž by byla obětována ohrusitelnost tohoto typického nástříku. Nitrid boru v nástříku Metco 2042 poskytuje solidní mazání, aby se minimalizovalo poškození lopatek během invaze. Doporučuje se, aby tyto povlaky po nástříku prošly tepelným zpracováním od 500 °C po dobu 4 – 5 hodin, aby se odstranila polyesterová složka ze struktury povlaku [14].

Tab. 3.2 Chemické složení žárového nástříku Metco 2042 [14]

Kobalt	27 %
Nikl	26 %
Chrom	17 %
Hliník	7 %
Yttrium	0,5 %
Nitrid boru	8,5 %
Polyester	14 %

Tab. 3.3 Žárový nástřík Metco 2042 [14]

Klasifikace	Ohrusný povlak
Hustota	$30,2 \pm 0,2 \text{ g / cm}^3$
Provozní teplota	$\leq 750 \text{ °C}$
Technologie nanášení	Nástřík plazmou
Aplikovaná tloušťka nástříků	2 – 2,5 mm



Obr. 3.3 Žárový nástřik Metco 2042

Žárový nástřik Metco 52C – NS

Metco 52C – NS je prášek z legovaného hliníku s 12 % křemíku. Je materiálem s vynikajícími vlastnostmi pro všeobecné použití. Jako ideální pro opravy a vytvoření jakéhokoliv druhu části z hliníku nebo hořčíku a jejich slitin. Metco 52C – NS vytváří povlaky, které jsou těžší a mírně hustší než povlaky vyrobené z komerčně čistého hliníkového prášku. Plazmově stříkané povlaky Metco 52C – NS jsou v současné době používány pro opravy opotřebovaných částí proudových motorů a obnovení rozměrových částí tryskových motorů. Povlaky Metco 52C – NS bývají používány všude tam, kde je žádoucí, aby při procesu klesla hluková hladina s teplotním rozprašováním [14].

Tab. 3.4 Žárový nástřik Metco 52C – NS

Klasifikace	Obrusný povlak
Chemické složení	Al 88 %; Si 12 %
Hustota	2,5 g / cm ³
Teplota tání	650 °C
Technologie nanášení	Nástřik plazmou
Aplikovaná tloušťka nástřiků	> 1,55 mm



Obr. 3.4 Žárový nástřik Metco 52C - NS

3.2 Obrábění žárově stříkaného povlaku

3.2.1 Metody obrábění žárově stříkaného povlaku

Metody obrábění používané u žárových nástřiků je třeba dobře zvážit. Rozhoduje se na základě několika kritérií. Jedno z důležitých kritérií je, aby nedocházelo k odpadávání části nástřiku při obrábění. Při odloupenutí žárového nástřiku z funkční plochy není povrch chráněn a neplní danou funkci. Dalším kritériem je opakovatelnost správného obrábění a stálý rozměr.

Metody používané k obrábění přestřiku:

Ruční ojetlení

Jednou z metod, jak lze obrábět hrany testovacích mezikružích, bylo ruční ojetlení. Je nejvíce univerzální metodou, kterou lze odstranit nástřik z hrany obrobku. Dokáže se jednoduše přizpůsobit aktuálnímu stavu, kdy není nijak složitá ruční manipulace s nástrojem a dokáže se přizpůsobit různým nakloněním, složitým tvarům a rozměrům. Nevýhodou ručního ojetlení jsou nepřesnosti, které vznikají počtem opakování a lidským faktorem.

Strojní obrábění

Jedná se o obrábění soustružením. Obrábění soustružením je rychlou a přesnou metodou obrábění, ovšem nevýhodou může být odpadávání velkých kusů nástřiku a zničení naneseného žárového nástřiku na ploše.

3.2.2 Použitý obráběcí stroj

Pro obrábění žárově stříkaných povlaků, kdy bylo třeba soustružit podélně testovací mezikruží, byl použit horizontální CNC soustruh od firmy Mori Seiki s označením NLX 2500/700 viz Obr. 3.5. Konstrukce zvoleného CNC soustruhu splňuje všechny možné požadavky pro soustružení testovacího mezikruží. Pro daný experiment byl stroj umístěn v laboratoři Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie.



Obr. 3.5 Soustružnicko frézovací centrum Mori Seiki NLX 2500/700

3.2.3 Použité řezné nástroje

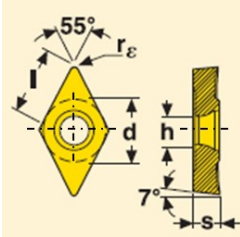
Soustružnické břitové destičky

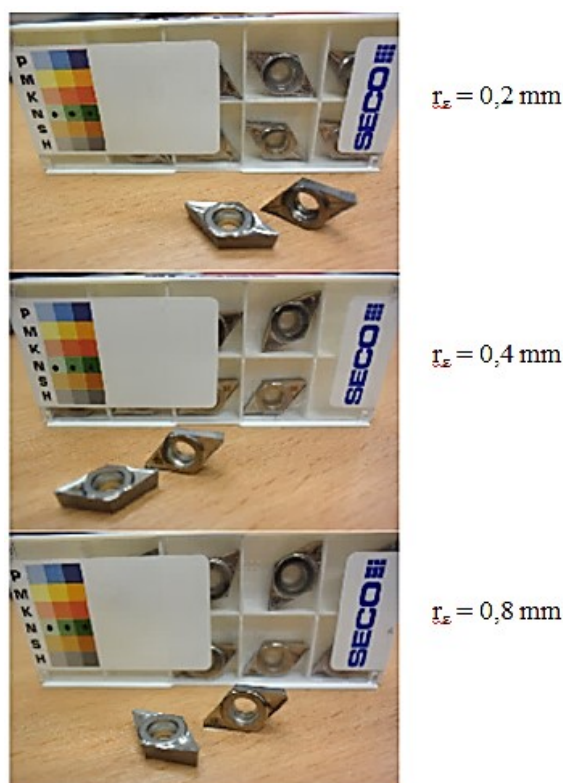
Obrábění nástřiku soustružnickými noži je klasickou metodou obrábění. V testech byly použity dva různé druhy nástrojů. Jednalo se o vyměnitelné břitové destičky firmy Seco, které byly použity pro soustružení nástřiku. Jedna z břitových destiček byla s označením DCGT. Je to vyměnitelná břitová destička kosočtvercového tvaru, která nebyla opatřena povlakem. Druhá vyměnitelná břitová destička byla s označením RCMT. Jednalo se o destičku s kruhovitým tvarem, která byla opatřena povlakem. Obě destičky byly určeny k obrábění hliníku a jeho slitin.

První vyměnitelná břitová destička s kladným úhlem hřbetu (7°) s označením DCGT a třídou KX náleží do optimalizované jemnozrné třídy, určené pro obrábění hliníku a dalších neželezných kovů. Byla použita s třemi různými poloměry zaoblení špičky. Poloměry zaoblení špičky byly 0,2; 0,4; 0,8 mm, kdy poloměry zaoblení špičky byly

jedním z hlavních parametrů při obrábění. V Tab. 3.5 jsou popsány základní rozměry a tolerance vyměnitelné břitové destičky DCGT.

Tab. 3.5 Vyměnitelná břitová destička DCGT 11T3(0,2; 0,4; 0,8)F – AL, KX [15]

	Tolerance	Typ VBD	Rozměry v mm				
	$d = \pm 0,025$	DCG T 11T3	d	l	s	h	r_ϵ
	$S = \pm 0,05$		9,52	11,60	3,97	4,4	0,2; 0,4; 0,8
	$r_\epsilon (\geq 0,2) = \pm 0,1$						

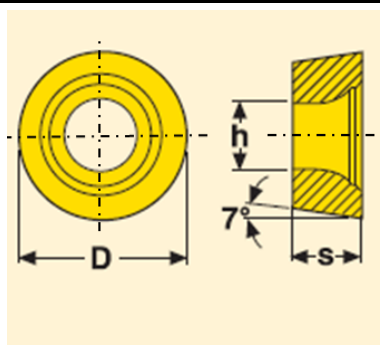


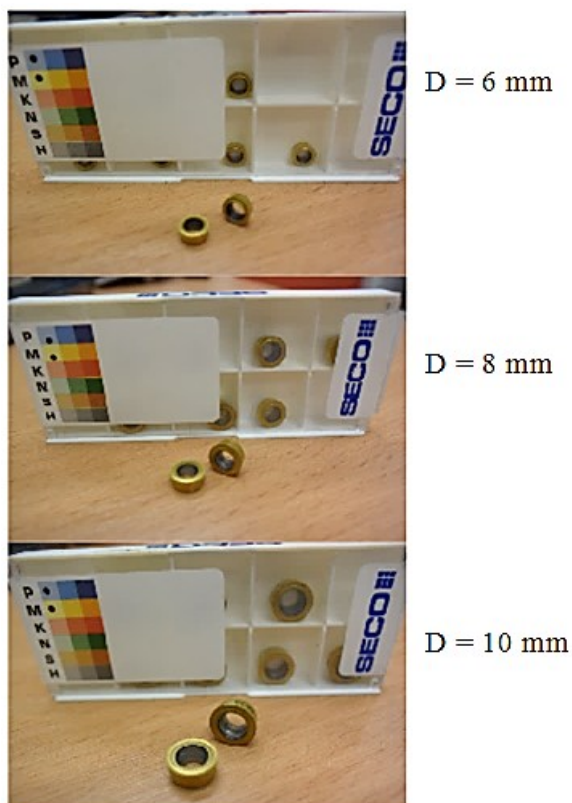
Obr. 3.6 Vyměnitelné břitové destičky s označením DCGT

Další použitá VBD byla také s kladným úhlem hřbetu (7°) s označením RCMT s kruhovým průřezem, a rovněž byla použita s několika druhy poloměrů zaoblení špičky. Třída materiálu CP500 je houževnatá jemnozrná třída vhodná pro dokončovací až středně hrubovací obrábění nerezových ocelí, ale se širokým použitím např. u oceli a hliníkových slitin. Průměry destiček byly 6, 8, 10 mm. Poloměry zaoblení špičky VBD s označením

RCMT, byly stejně jako poloměry zaoblění špičky u destiček DCGT velice důležité při obrábění žárových nástřiků. V Tab. 3.6 jsou popsány VBD kruhového tvaru.

Tab. 3.6 Vyměnitelná břitová destička RCMT (0602; 0803; 10T3)MO – F1, CP500 [15]

	Tolerance	Typ VBD	Rozměry v mm		
	$D = \pm 0,05$		D	s	h
$s = \pm 0,05$		0602	6,00	2,38	2,9
		0803	8,00	3,18	3,5
		10T3	10,00	3,97	4,5



Obr. 3.7 Vyměnitelné břitové destičky s označením RCMT

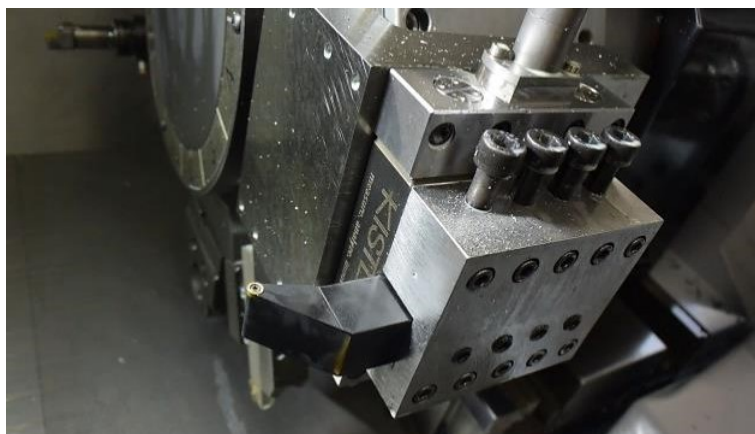
3.2.4 Volba řezných podmínek

Proces obrábění bývá charakterizován řeznými podmínkami, jedná se o řeznou rychlost v_c , posuv f a hloubka řezu a_p . Při volbě správných řezných podmínek bylo nutné brát ohledy na obráběný materiál a jeho mechanické vlastnosti. Stejně je to u žárově stříkaných povlaků, kdy se musely brát v potaz vlastnosti žárových nástřiků. Řezné podmínky byly voleny přibližně v rozmezí hodnot, které jsou uvedeny v Tab. 2.1. Řezná rychlost se v tabulkových hodnotách pohybuje pro námi zvolené vyměnitelné břitové destičky s kladným úhlem hřbetu do 70 m/min. V případě této diplomové práce byla zvolena řezná rychlost 300 m/min, posuv obrábění při obrábění žárově stříkaného povlaku na čisto se volil 0,15 mm. Hloubka řezu byla zvolena nižší, než jsou uvedené poloměry zaoblení špičky nástroje u vyměnitelné břitové destičky s označením DCGT, a to 0,2 mm.

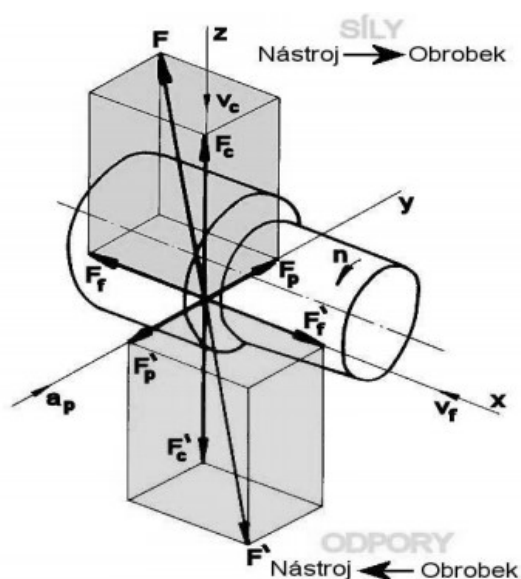
3.2.5 Měření složek řezných sil při obrábění

Pro měření řezných sil během procesu obrábění byl použit třísložkový dynamometr. Dynamometr jakožto měřicí přístroj musí zaručit nezávislost měřicí veličiny na provozních vlastnostech přístroje. Třísložkový dynamometr se skládá z pláště o vysoké tuhosti, z tělesa držáků nože a měřicích článků, jejichž nedílnými součástmi jsou tenzometrické snímače. Samostatnou část podobně jako u předchozích dynamometrů představuje část elektrická. Tento dynamometr používá zpravidla 8 snímacích článků. Těleso nožového držáku je uloženo na snímacích člancích obsahujících deformační tělíska s nalepenými tenzory. Dynamometrem se podařilo naměřit řeznou složku sílu F_c , pasivní složku sílu F_p a posuvovou složku sílu F_f . Jednotlivé naměřené řezné složky síly jsou na sebe vzájemně kolmé a lze z nich dopočítat výslednou sílu řezání F podle následujícího vztahu[18]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} \quad [N] \quad 3.2.5.1$$



Obr.3.8 Upnutí nástroje do dynamometru Kistler



Obr. 3.9 Rozklad složek řezných sil při soustružení [18]

Síla řezání (obráběcí), je významnou silou. Stav napjatosti v obráběném materiálu způsobuje řezný odpor R , který síla řezání musí při obrábění neustále překonávat [18].

Pro podmínku rovnováhy tak platí [18]:

$$F = - R \quad [N] \quad 3.2.5.2$$

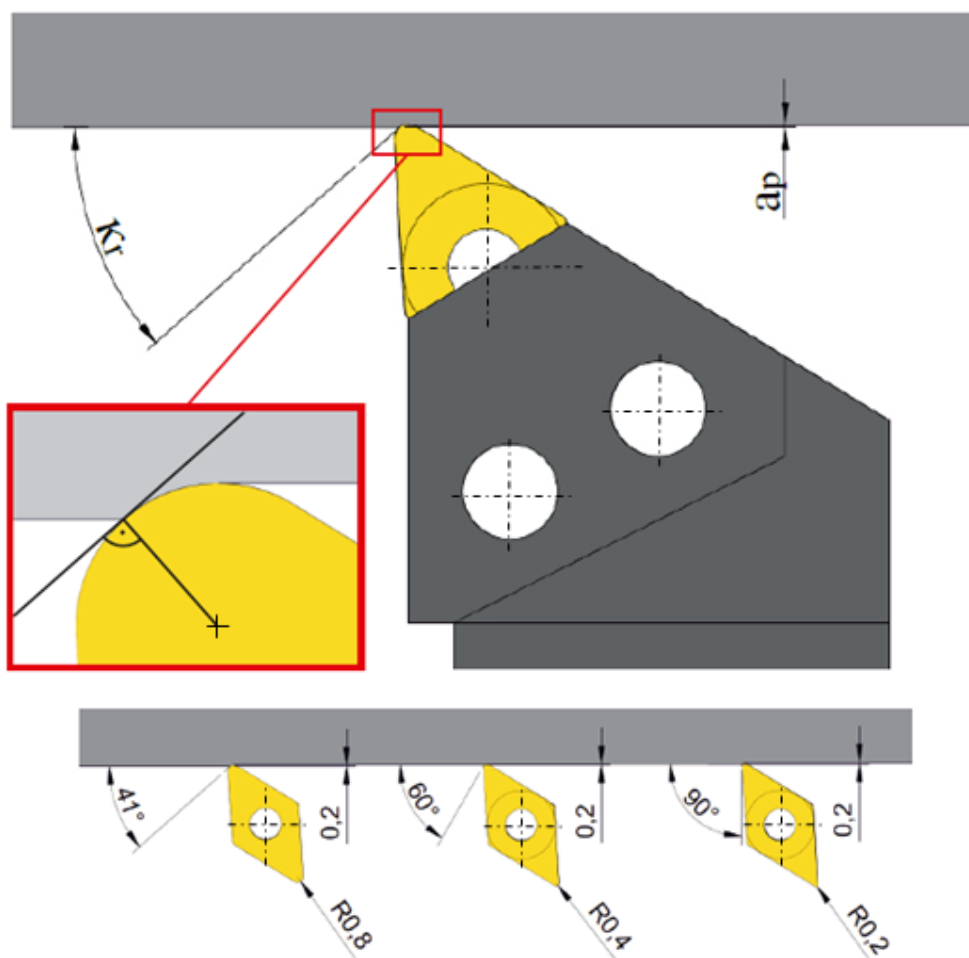
F ... síla řezání (obrábění) ... $[N]$,

R ... řezný odpor ... $[N]$.

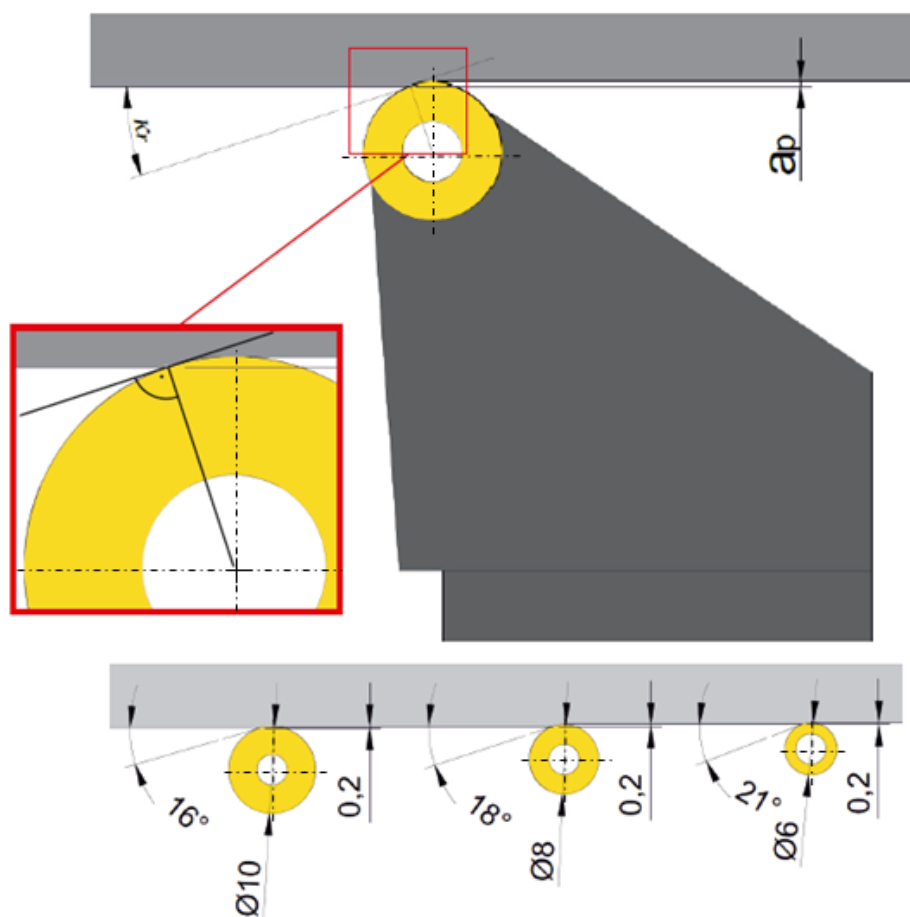
Poměr složek sil při podélném soustružení je dán především určitou technologií obrábění a geometrií nástroje. Největší význam a vliv na optimalizaci řezných podmínek má řezná složka síly F_c , kterou je třeba snížit. Malé velikosti složky řezné síly F_c se může

docílit změnou poloměru zaoblení špičky r_ϵ , který je větší než hloubka odebírané třísky a_p ($r_\epsilon > a_p$) [20].

Geometrické parametry bříty mají také značný vliv na velikost řezných sil. Poloměr zaoblení špičky r_ϵ a průměr VBD kruhové geometrie má vliv na velikost řezných sil a na kvalitu obrobené plochy. S hloubkou řezu a_p a poloměru zaoblení špičky r_ϵ vyměnitelné břitové destičky se mění také úhel nastavení hlavního ostří κ_r . Úhel nastavení hlavního ostří κ_r se obvykle volí 45° , ale u VBD s kruhovou geometrií může dosáhnout i menších úhlů viz Obr. 3.10 a Obr. 3.11 [20].



Obr. 3.10 Úhel nastavení hlavního ostří κ_r u VBD s označením DCGT



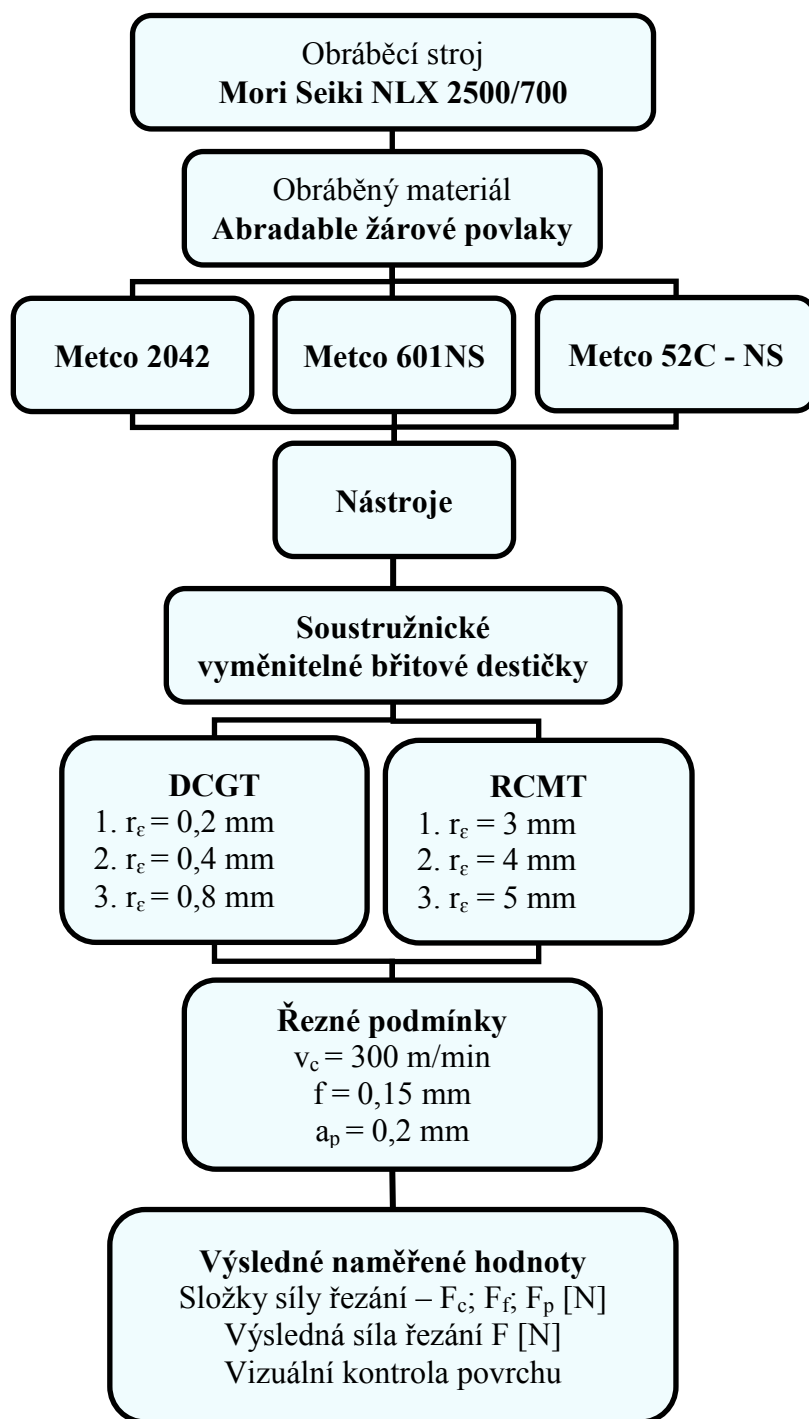
Obr. 3.11 Úhel nastavení hlavního ostří κ_r u VBD s označením RCMT

Během obrábění působí obrobek na nástroj a je třeba, aby byl měrný řezný odpor co nejmenší. Měrný řezný odpor je vyjádřen řeznou silou, vztaženou na jednotku plochy řezu a je definován jako poměr řezné složky F_c a plochy jmenovitého průřezu třísky A_D [20].

Měrný řezný odpor lze vyjádřit ze vztahu [20]:

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad [N \cdot mm^{-2}] \quad 3.2.5.3$$

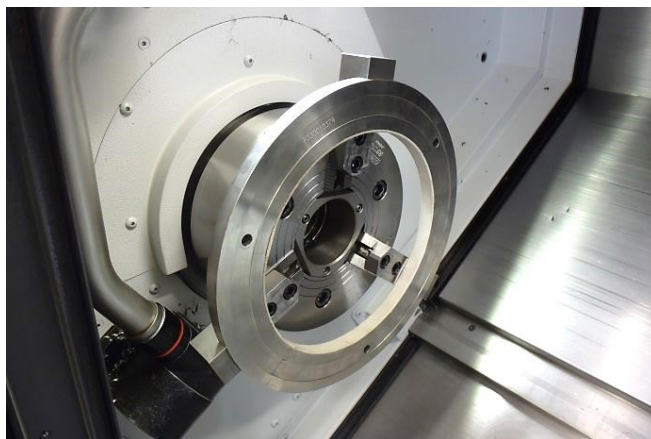
3.2.6 Schéma experimentální činnosti



Obr. 3.12 Schéma navrženého experimentu

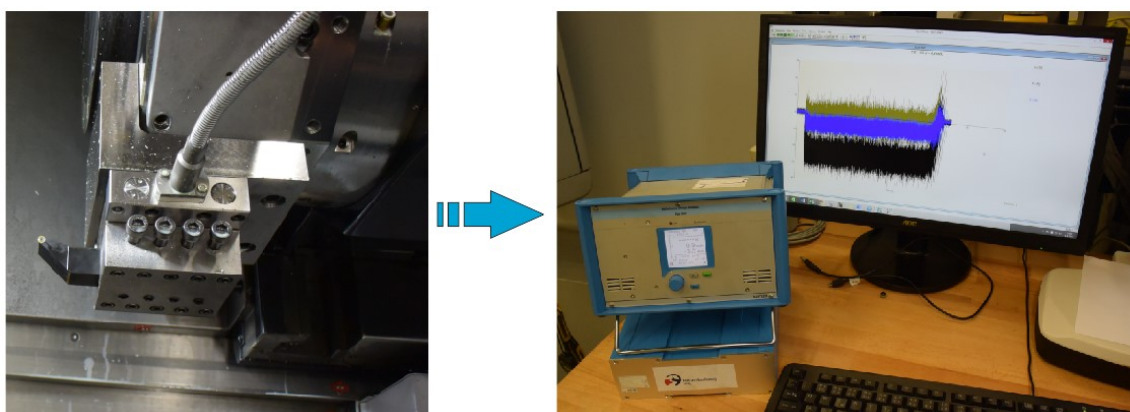
4. Obrábění žárově stříkaných povrchů

Testování probíhalo v laboratoři katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie. Během testování bylo pro daný experiment k dispozici CNC soustružnicko frézovací centrum, viz Obr 3.5. Testování probíhalo na testovacích mezikružích, které byly opatřeny třemi různými abradable povlaky viz Obr. 4.1.



Obr. 4.1 Testovací mezikruž upnuto ve skličidle

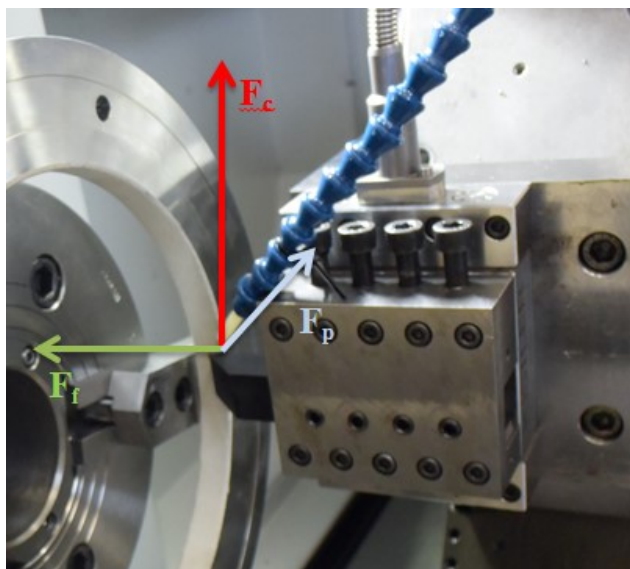
Během obrábění abradable povlaku zvolenými VBD probíhalo měření složek řezných sil. K měření byl k dispozici třísložkový univerzální stacionární dynamometr Kistler 9129AA, zesilovač typu 5070A a počítačový software Dynoware. Za pomoci tohoto softwaru lze provést vlastní měření sil řezání, které působí na řezný nástroj při obrábění. Následně se počítačovou analýzou za pomoci získaných hodnot zobrazily složky řezných sil v podobě grafu.



Obr. 4.2 Propojení dynamometru, počítačové jednotky, zesilovače, analogového převodníku a počítače kde se zobrazují výsledné grafy

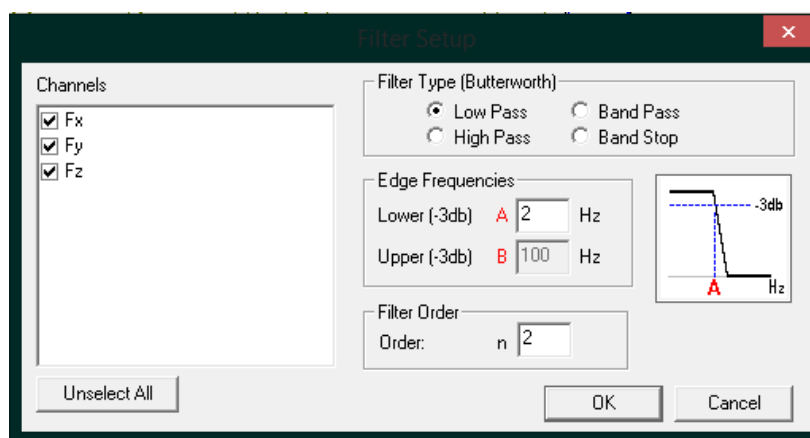
4.1 Nastavení silových poměrů při obrábění

Vzhledem k tomu, že se při testování obrábělo uvnitř mezikruží, bylo potřeba pootočit dynamometr. Tím došlo k přehození souřadného systému měřených hodnot. Při měření odpovídaly jednotlivé složky směru F_x posuvové složce síly F_f , F_y byla hlavní řeznou složkou síly F_c a F_z pasivní složkou síly F_p . Hodnoty složek řezných sil znázorněné v grafu, které nabývají záporných hodnot, mají v reálu kladná čísla.



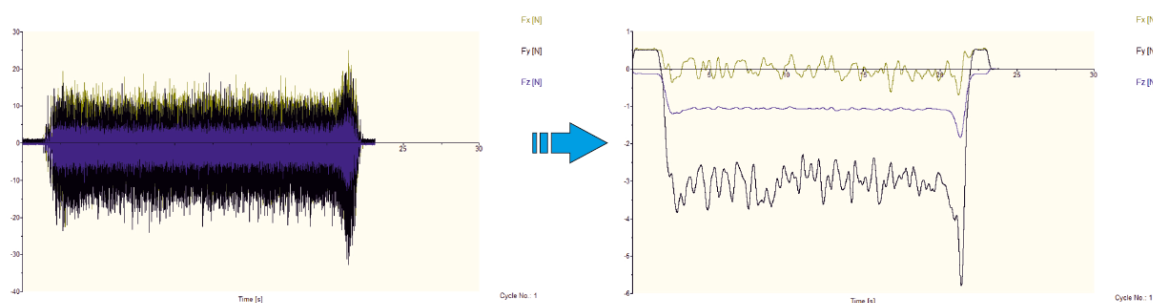
Obr. 4.3 Souřadný systém dynamometru Kistler

Během obrábění abradable nástřiku nebyly naměřené hodnoty složek řezných sil příliš velké a bylo nutné nastavit filtrování v softwaru Dynoware. Příčinou byly žárové nástříky s označením 601 NS a 2042, jenž jsou vysoce porézní povlaky a bylo třeba se zbavit vysoké frekvence kmitání.



Obr. 4.4 Nastavení filtru v softwaru Dynoware

Na Obr. 4.5 je znázorněn graf, při obrábění povlaku s označením 2042 bez filtrovaných hodnot a následně graf s filtrovanými hodnotami. Z grafu lze vyčíst velikost složek řezných sil během obrábění.

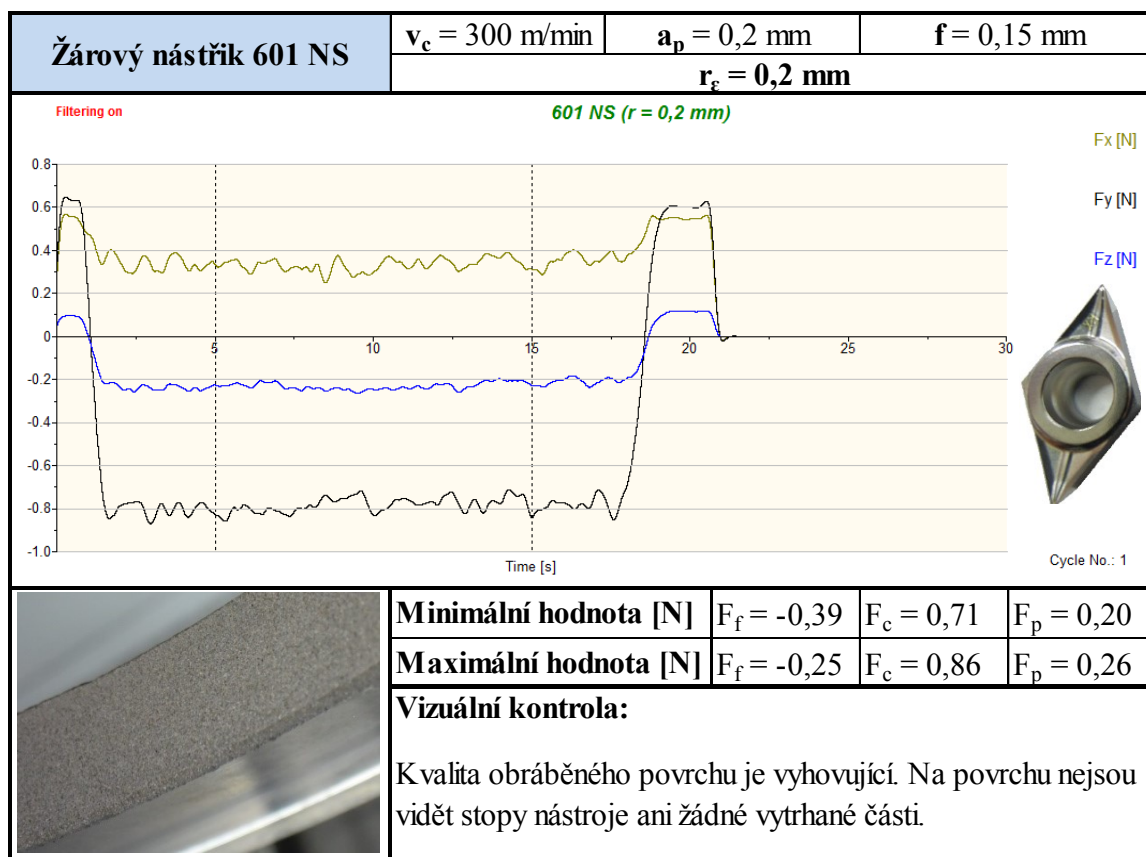


Obr. 4.5 Filtrování grafu a) nefiltrovaný graf vlevo, b) graf po filtraci vpravo

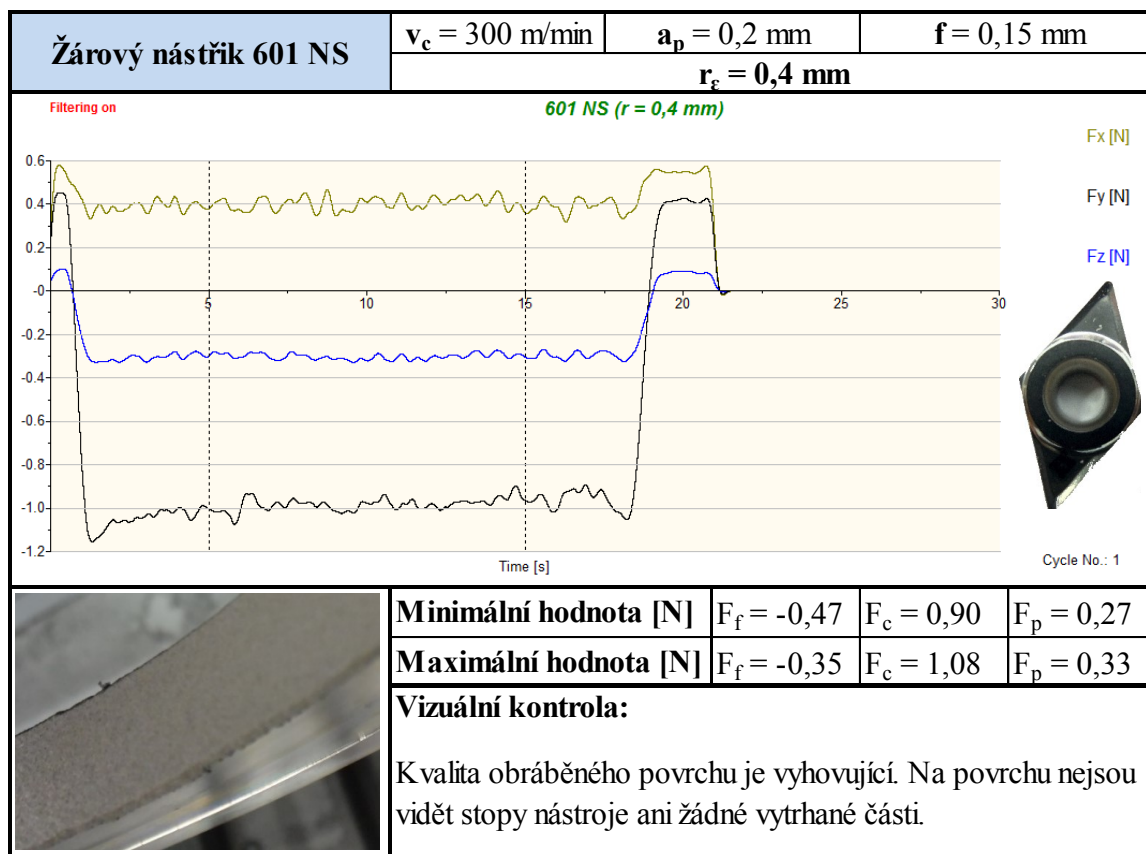
4.2 Vyhodnocení silových poměrů při obrábění

V následujících tabulkách jsou uvedeny výsledky z obrábění jednotlivých žárových povlaků. V tabulkách jsou uvedeny řezné parametry, za kterých experiment probíhal. Tabulky obsahují grafy s filtrovanými hodnotami složek řezných sil. V každém z grafu je znázorněn interval, ve kterém následně probíhalo měření a vyhodnocení hodnot složek řezných sil. Interval, kde se měřily složky sil, byl zvolen tam, kde probíhal plynulý ustálený průběh soustružení bez náběhu a výběhu nástroje. V následujících tabulkách jsou uvedeny minimální a maximální hodnoty složek řezných sil, je vizualizace povrchu po soustružení a popis obrobeného povrchu.

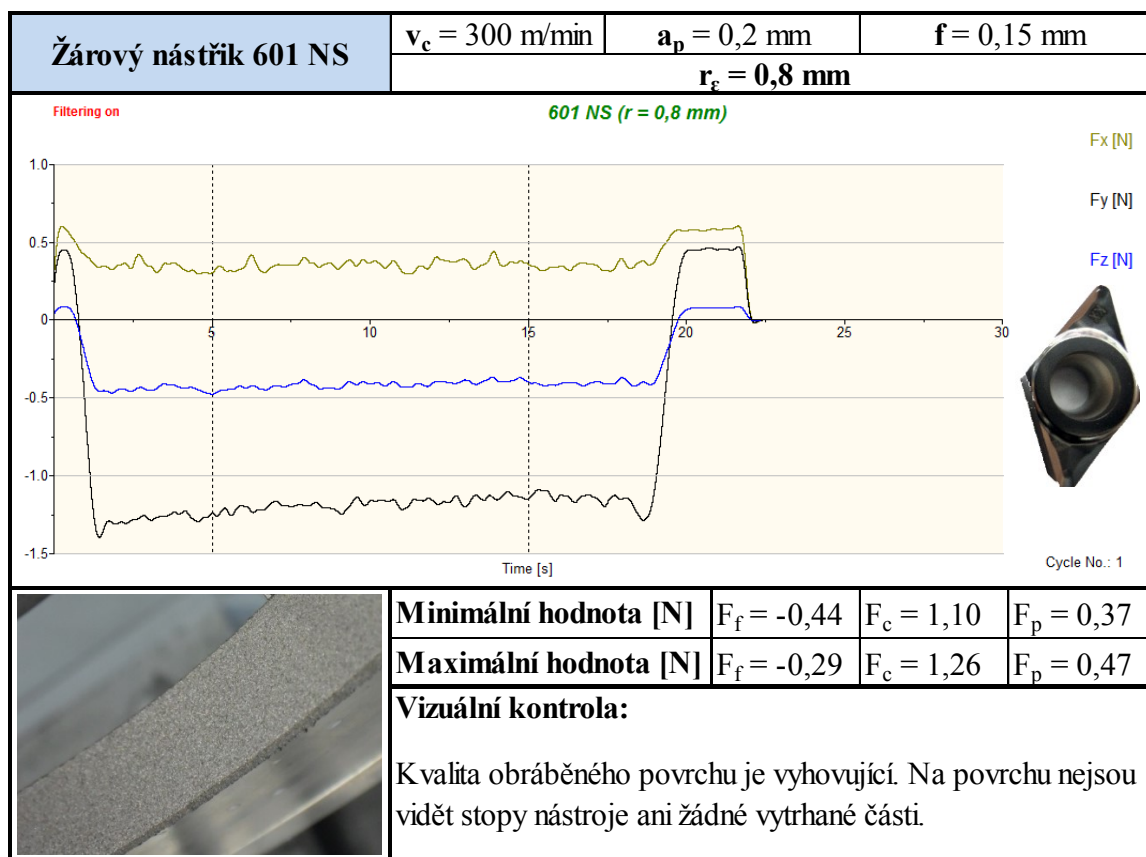
Tab. 4.1 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 601 NS s $r_\epsilon = 0,2$ mm



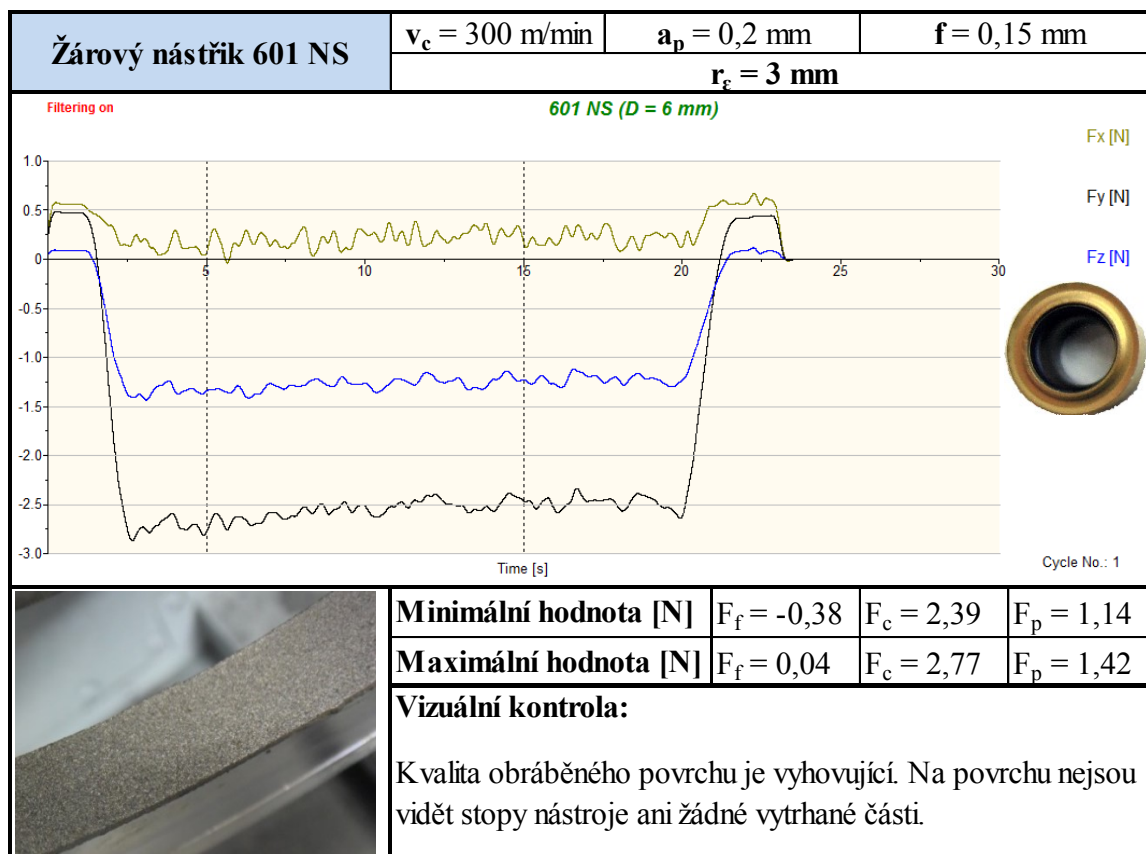
Tab. 4.2 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 601 NS s $r_\epsilon = 0,4$ mm



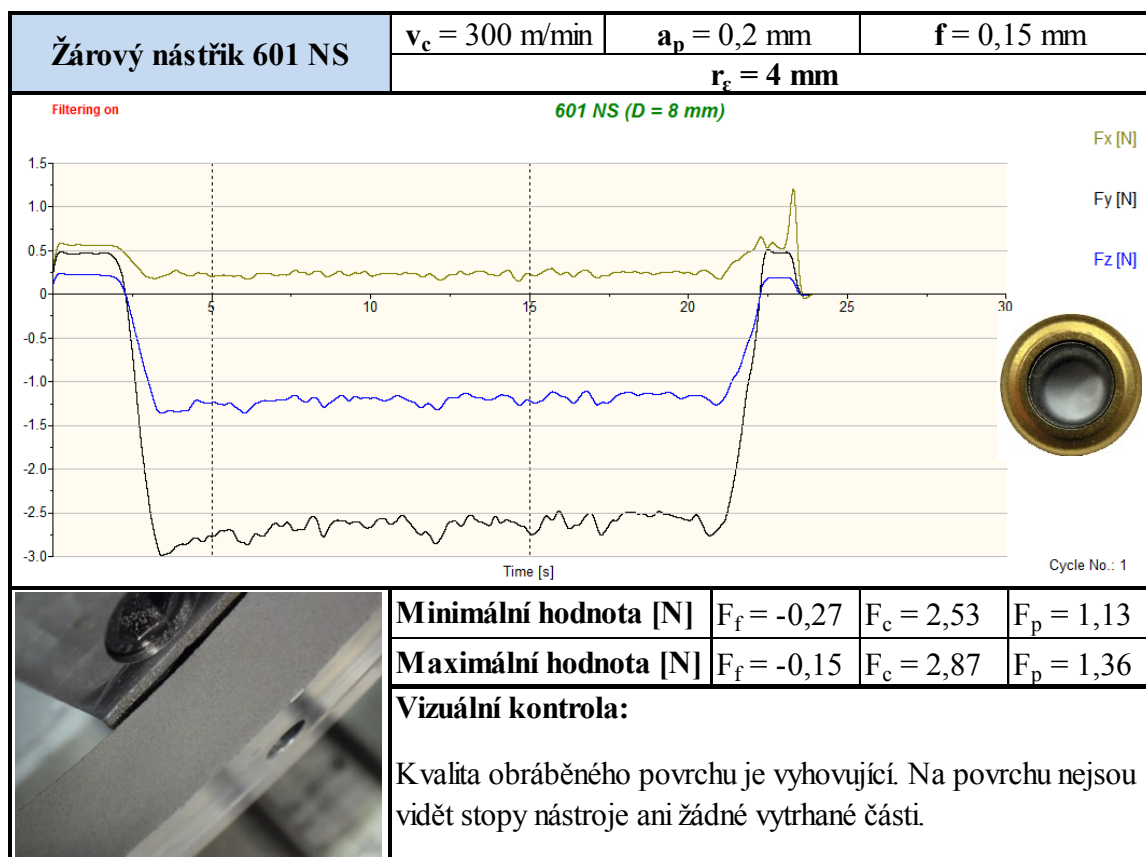
Tab. 4.3 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 601 NS s $r_e = 0,8$ mm



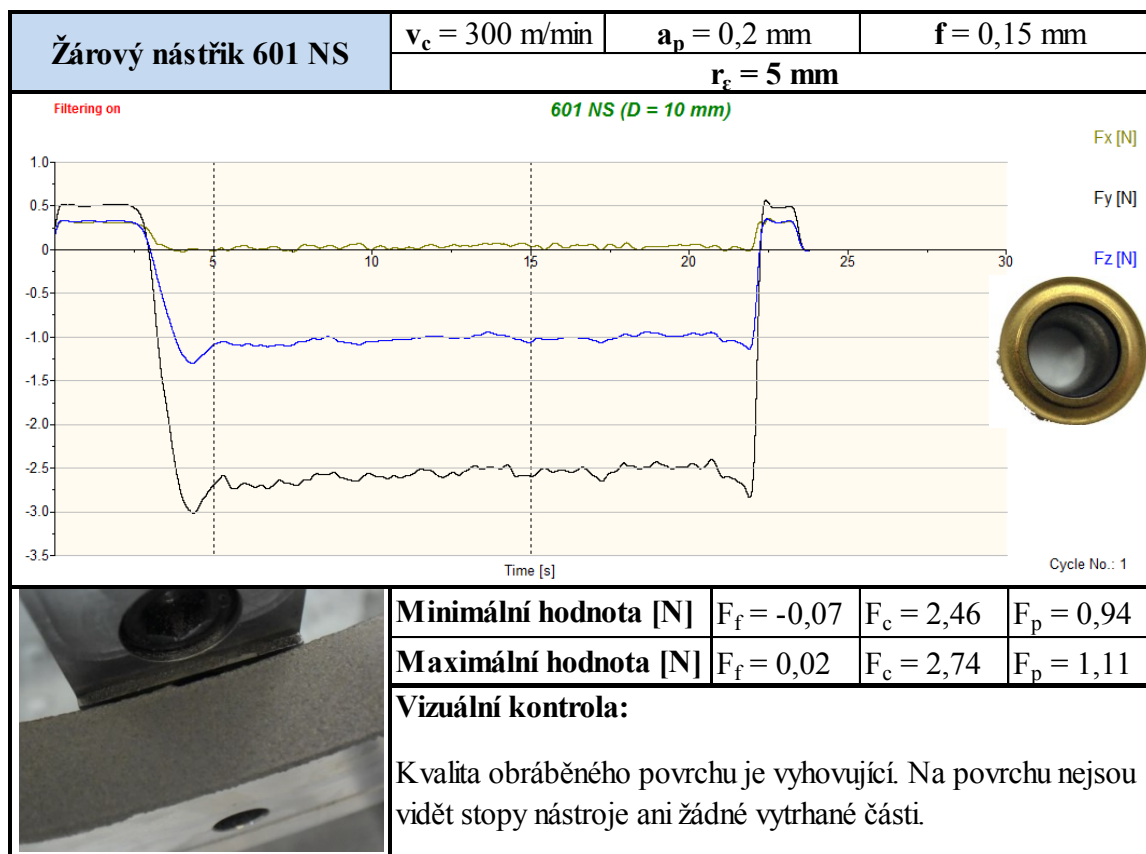
Tab. 4.4 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 601 NS s $r_e = 3$ mm



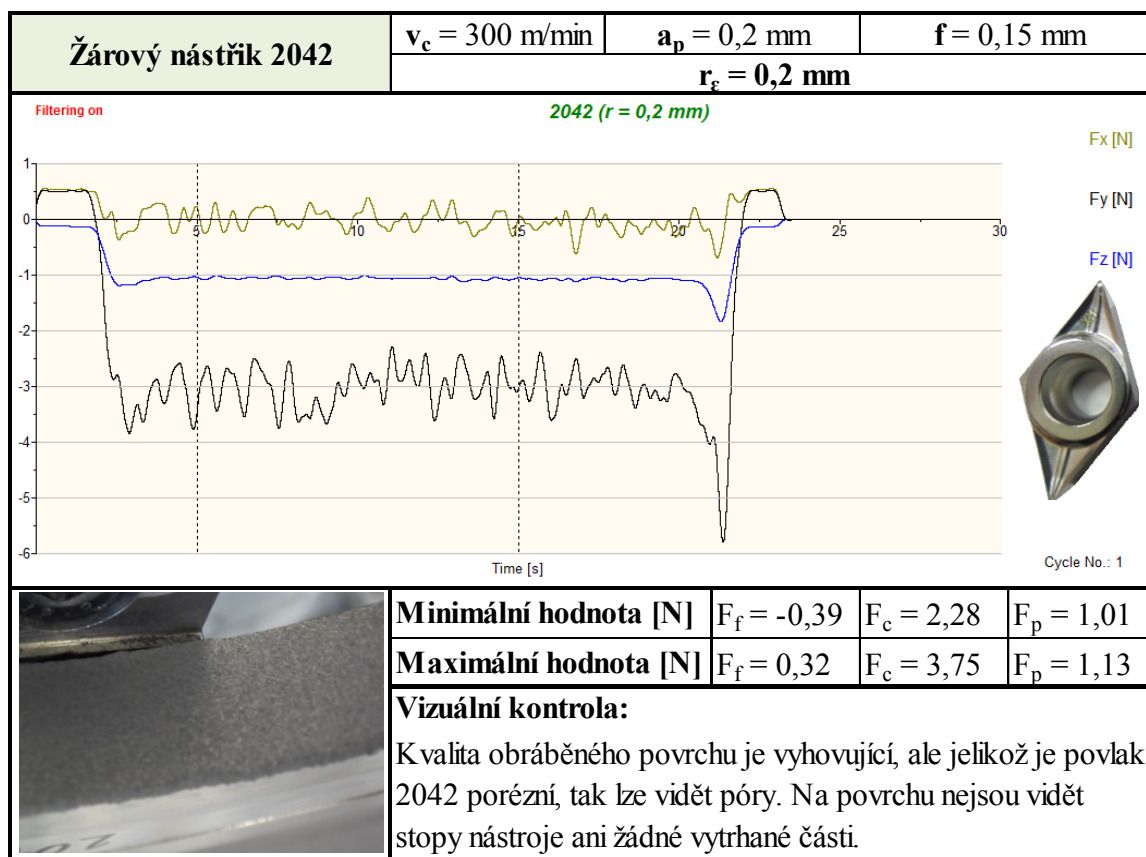
Tab. 4.5 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 601 NS s $r_e = 4$ mm



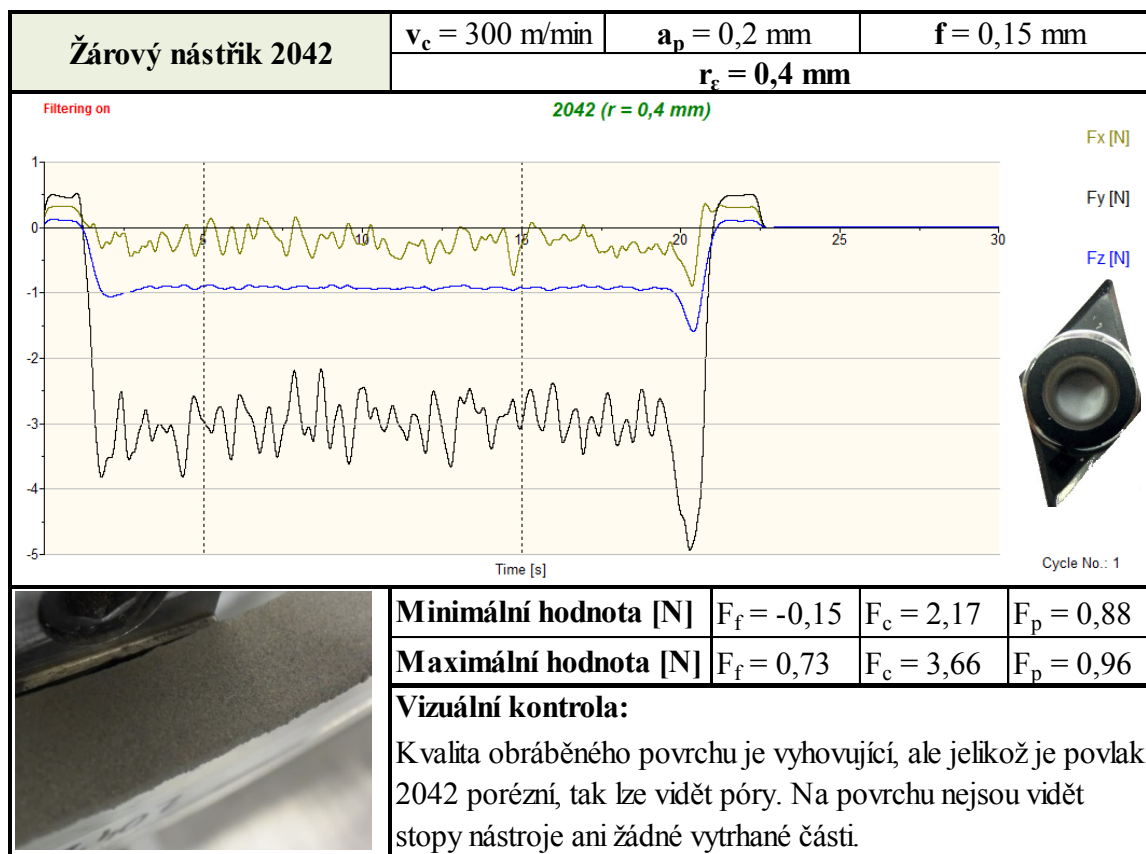
Tab. 4.6 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 601 NS s $r_e = 5$ mm



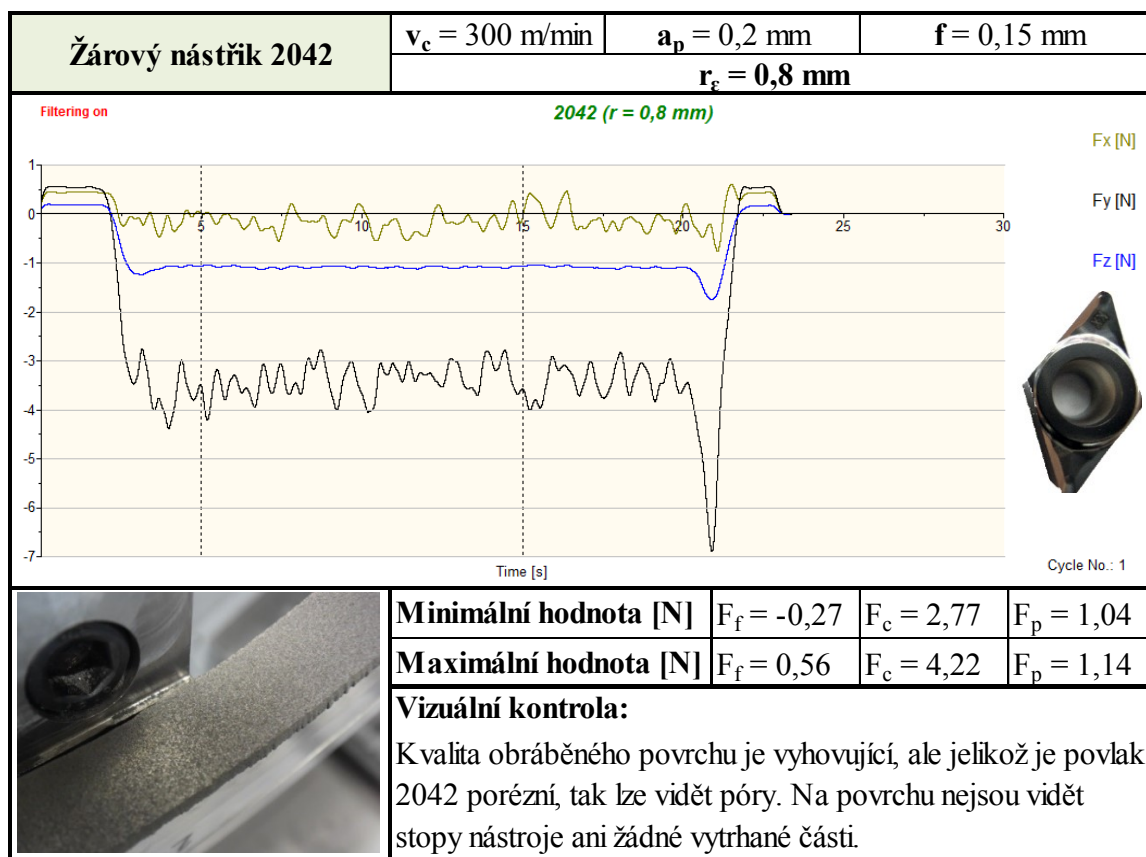
Tab. 4.7 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 2042 s $r_e = 0,2$ mm



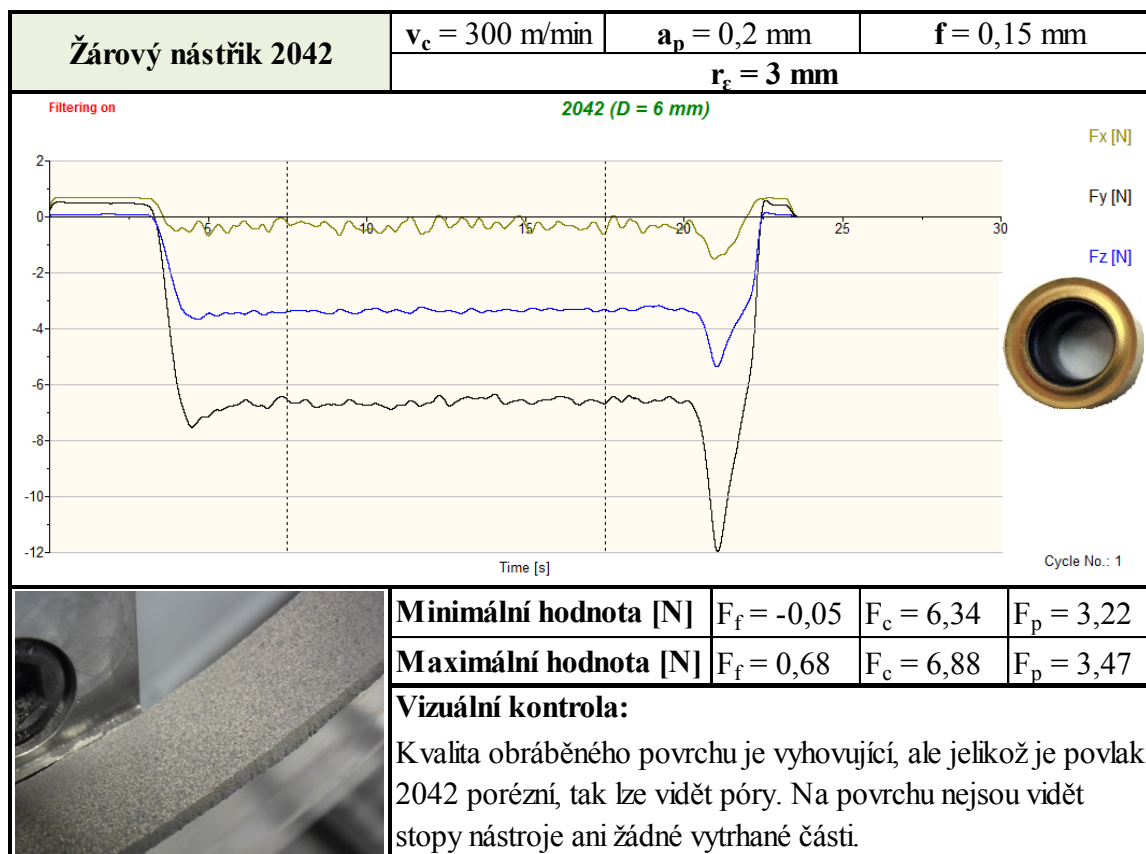
Tab. 4.8 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 2042 s $r_e = 0,4$ mm



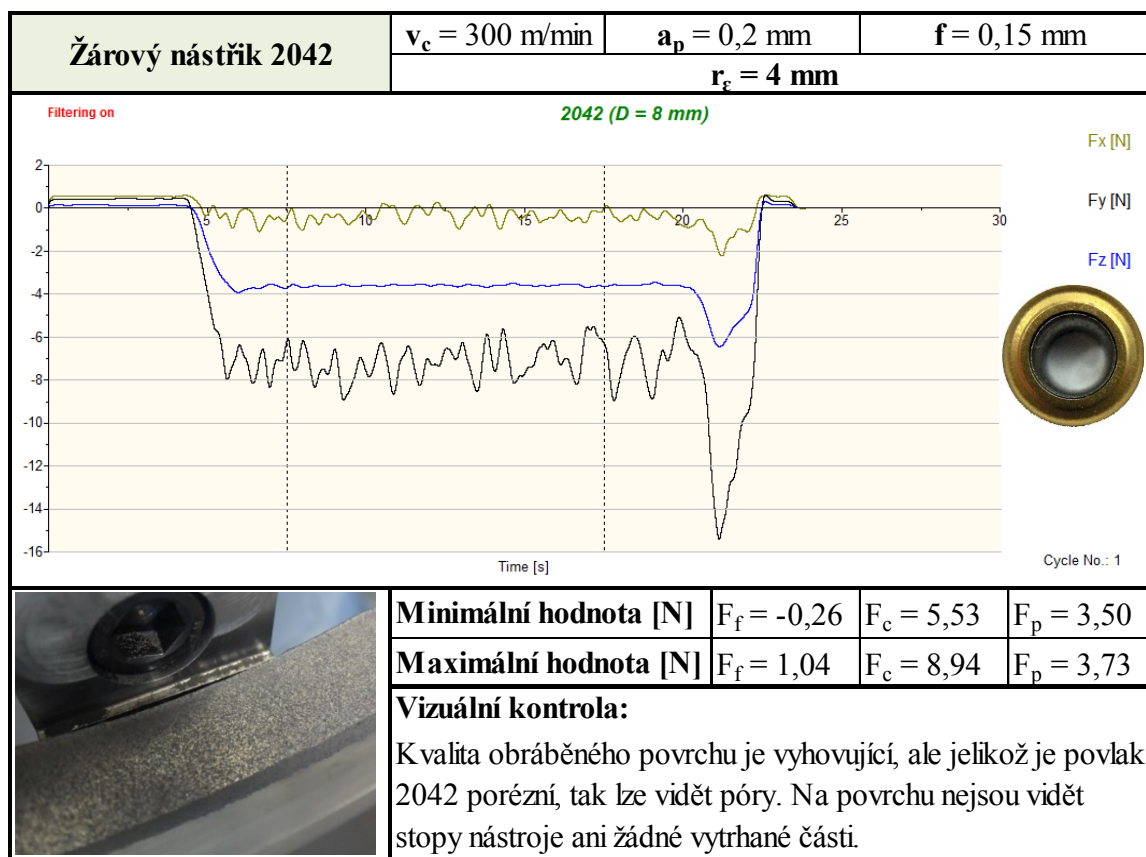
Tab. 4.9 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 2042 s $r_e = 0,8$ mm



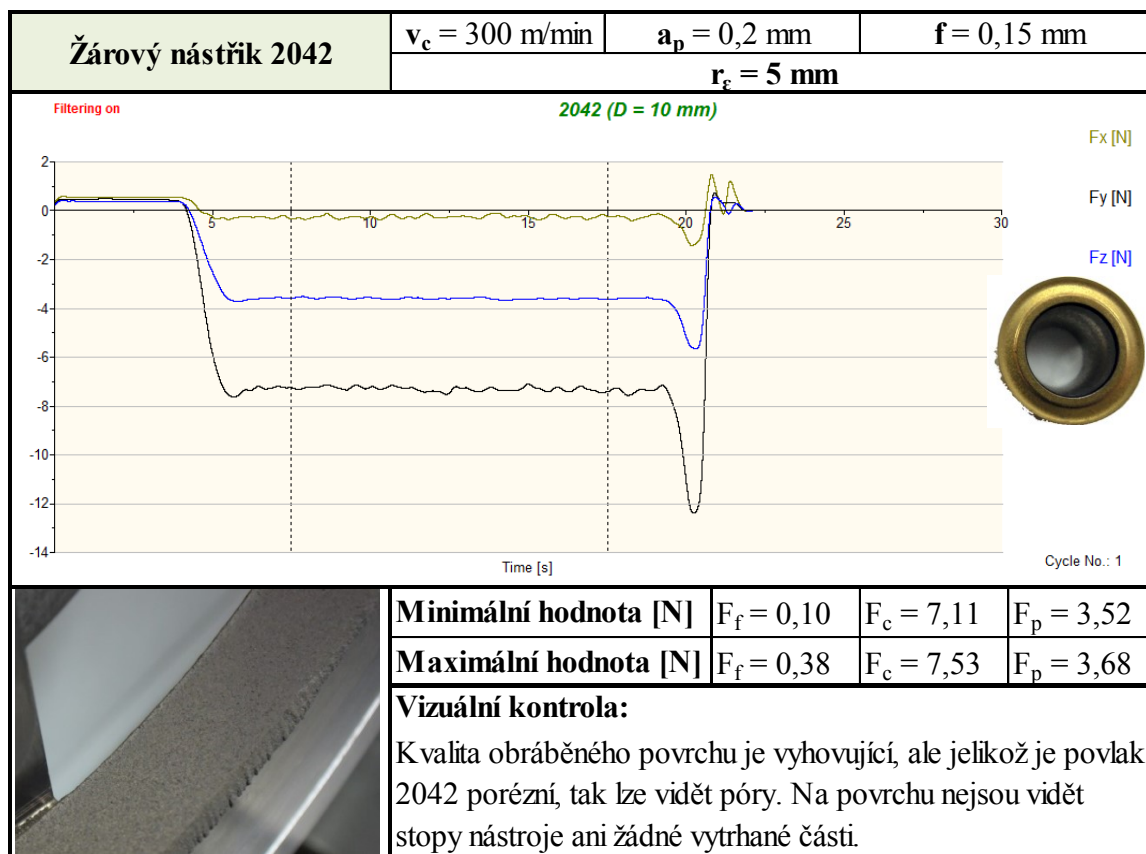
Tab. 4.10 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 2042 s $r_e = 3$ mm



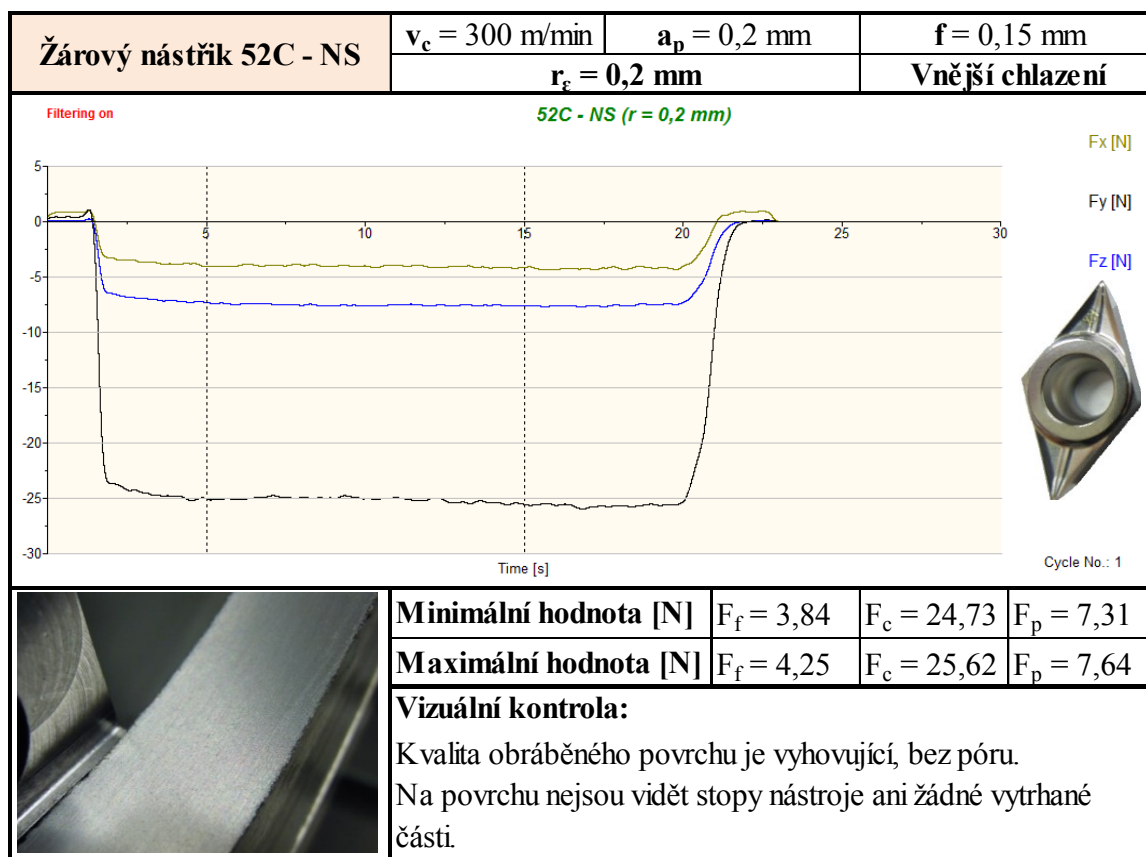
Tab. 4.11 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 2042 s $r_e = 4$ mm



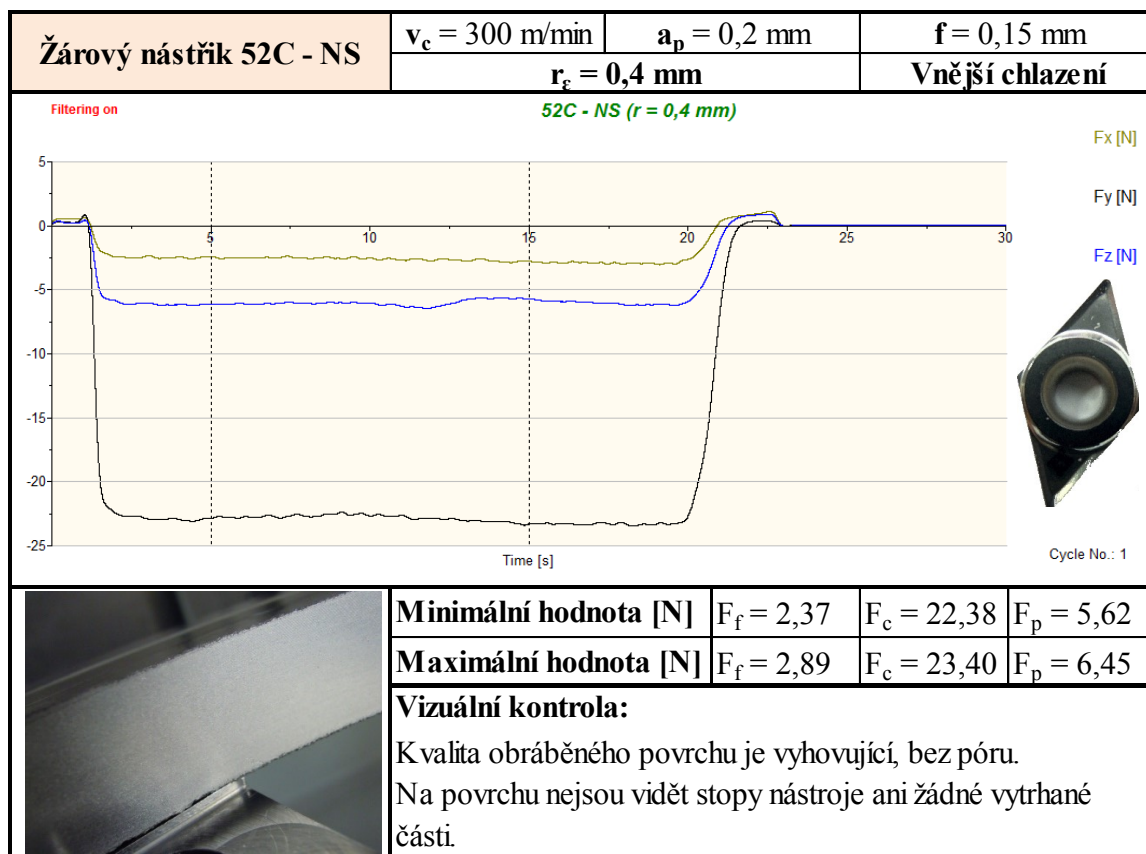
Tab. 4.12 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 2042 s $r_e = 5$ mm



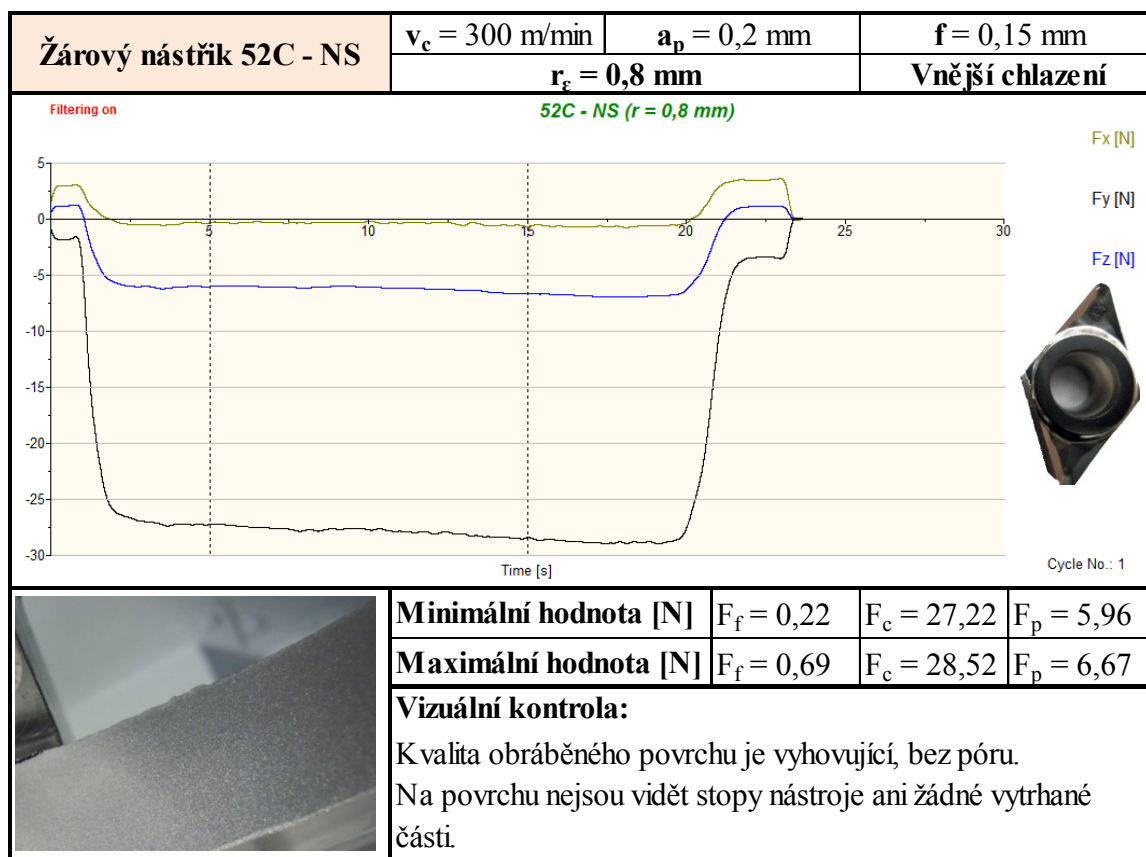
Tab. 4.13 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 0,2$ mm



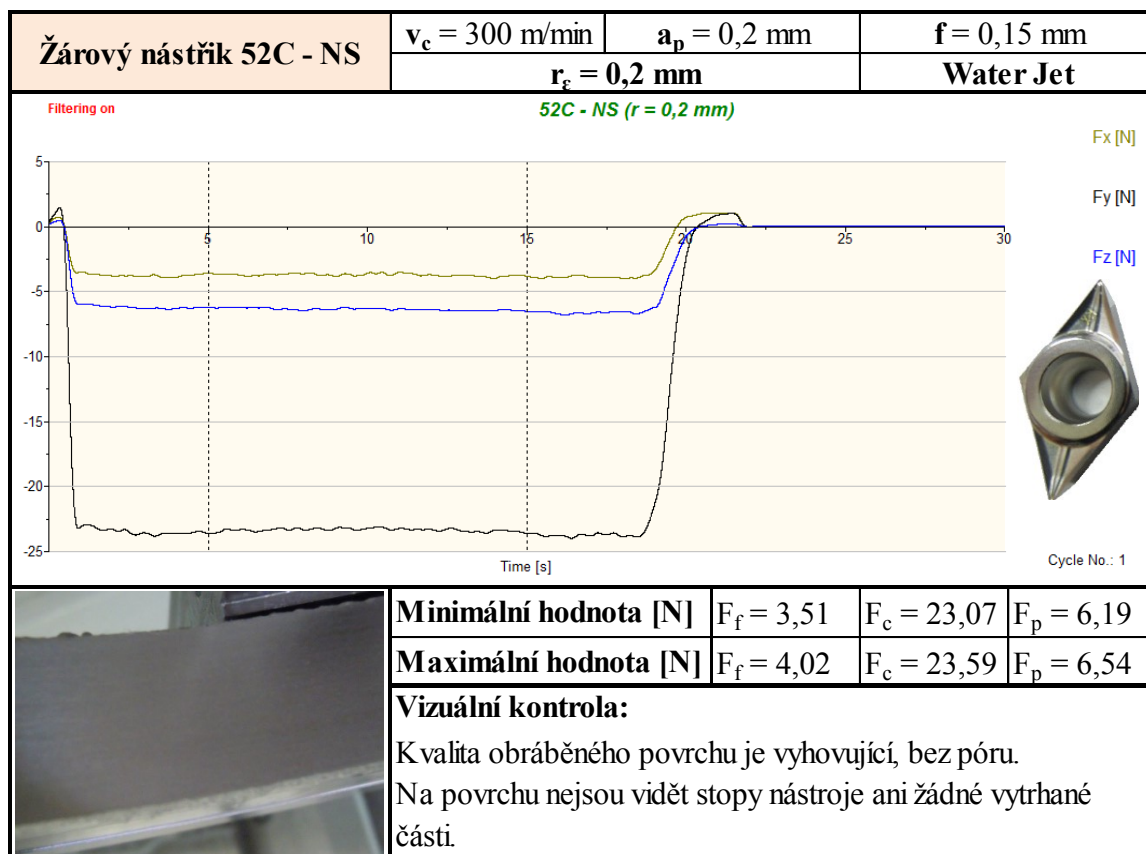
Tab. 4.14 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 0,4$ mm



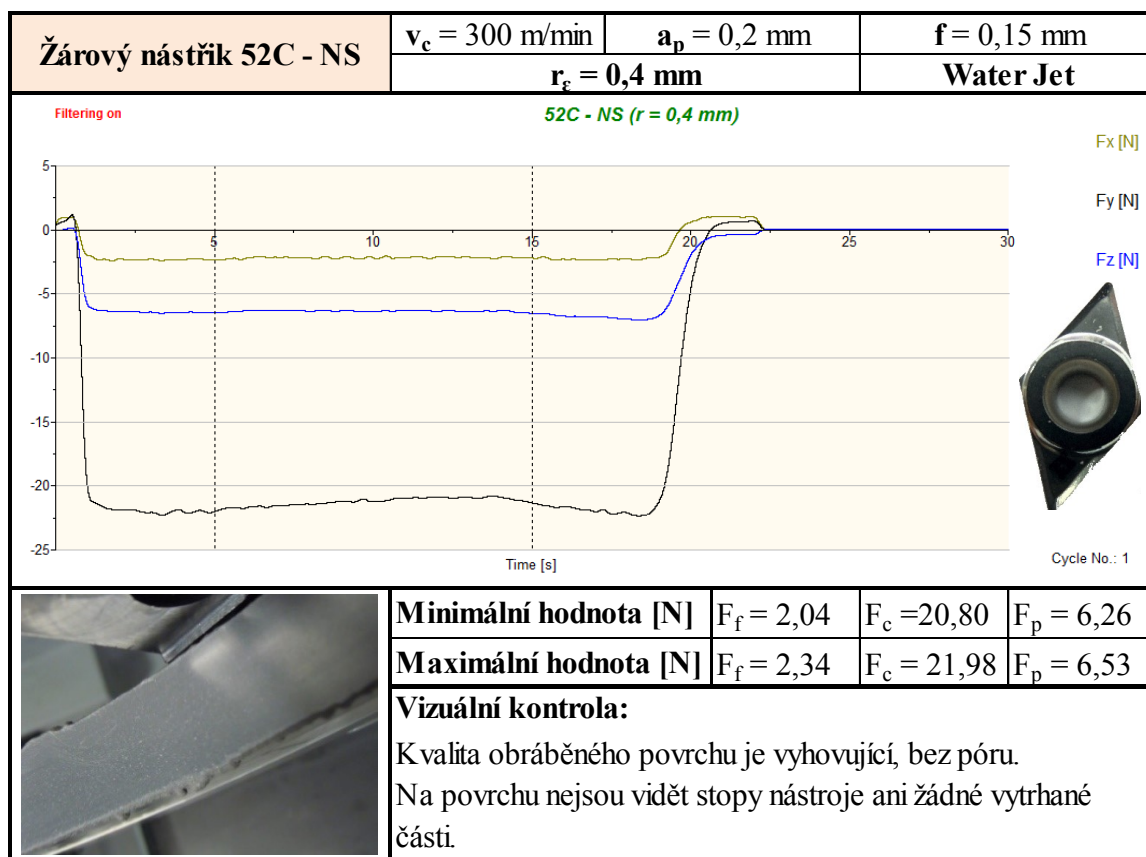
Tab. 4.15 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 0,8$ mm



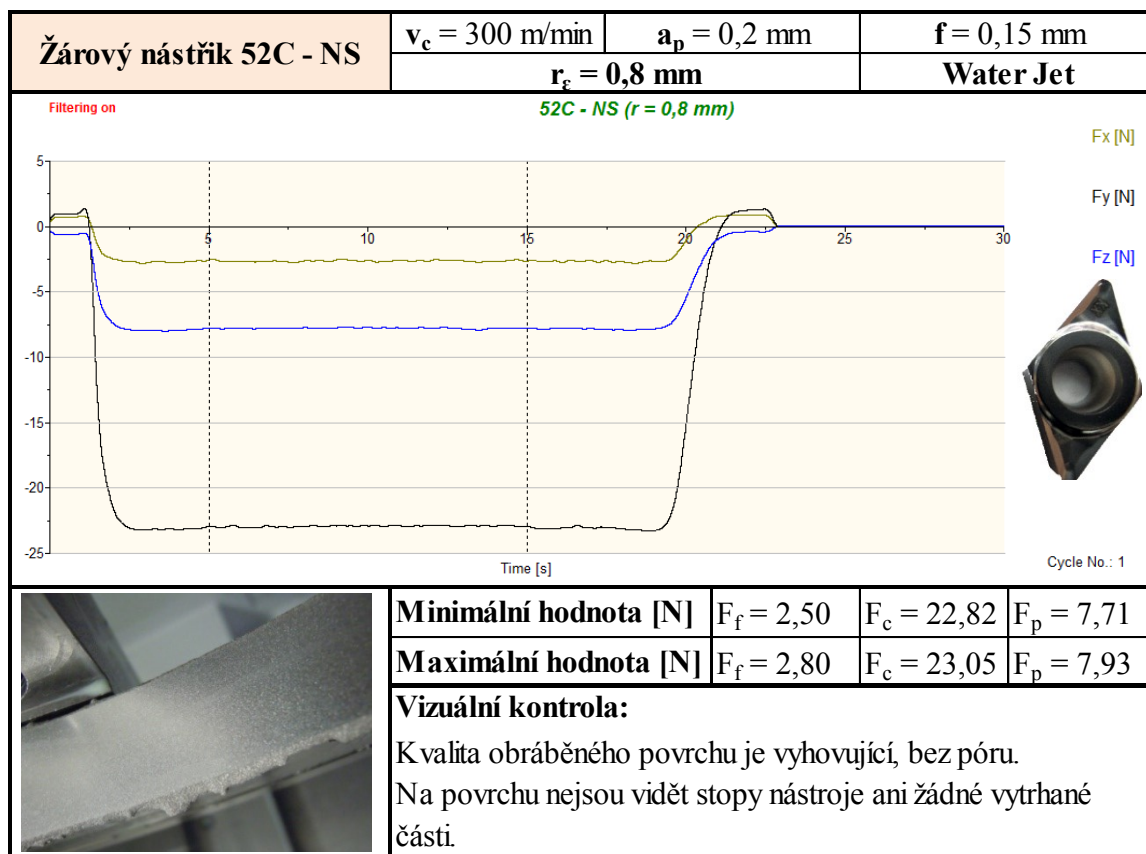
Tab. 4.16 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 0,2$ mm



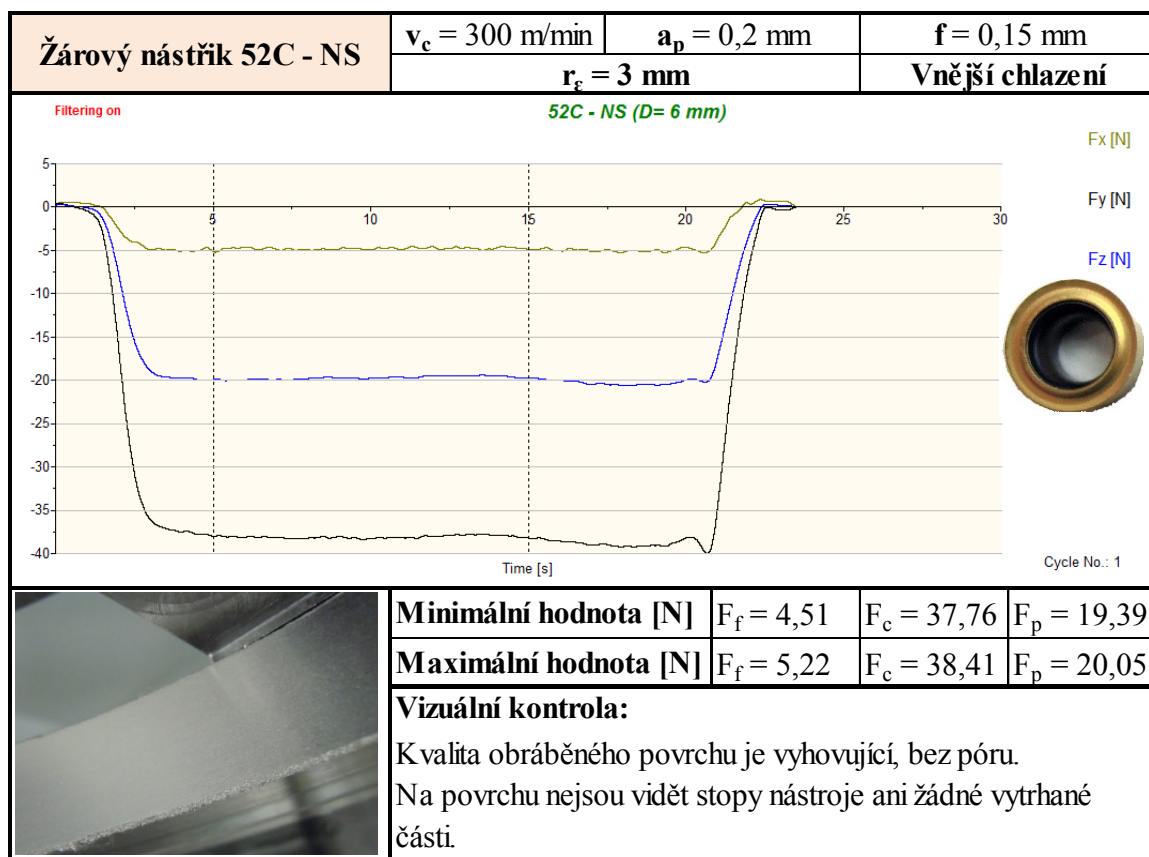
Tab. 4.17 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 0,4$ mm



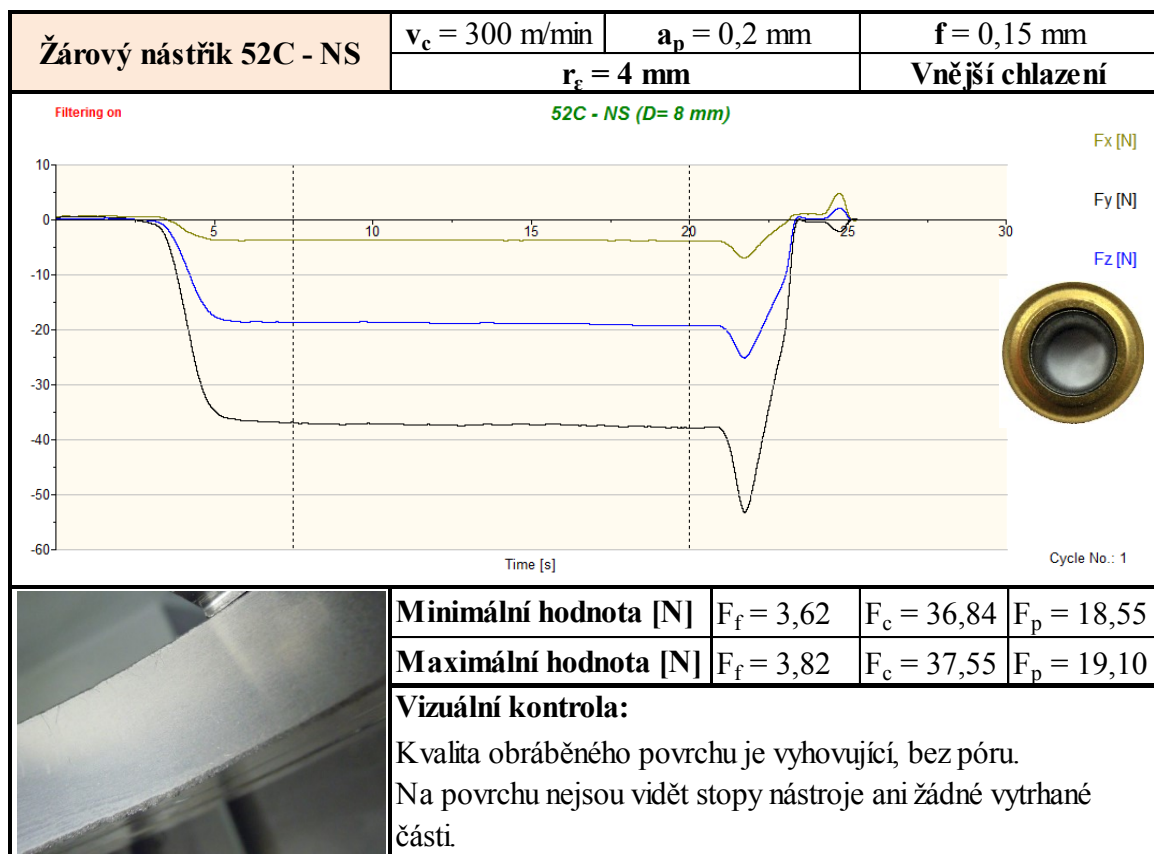
Tab. 4.18 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 0,8$ mm



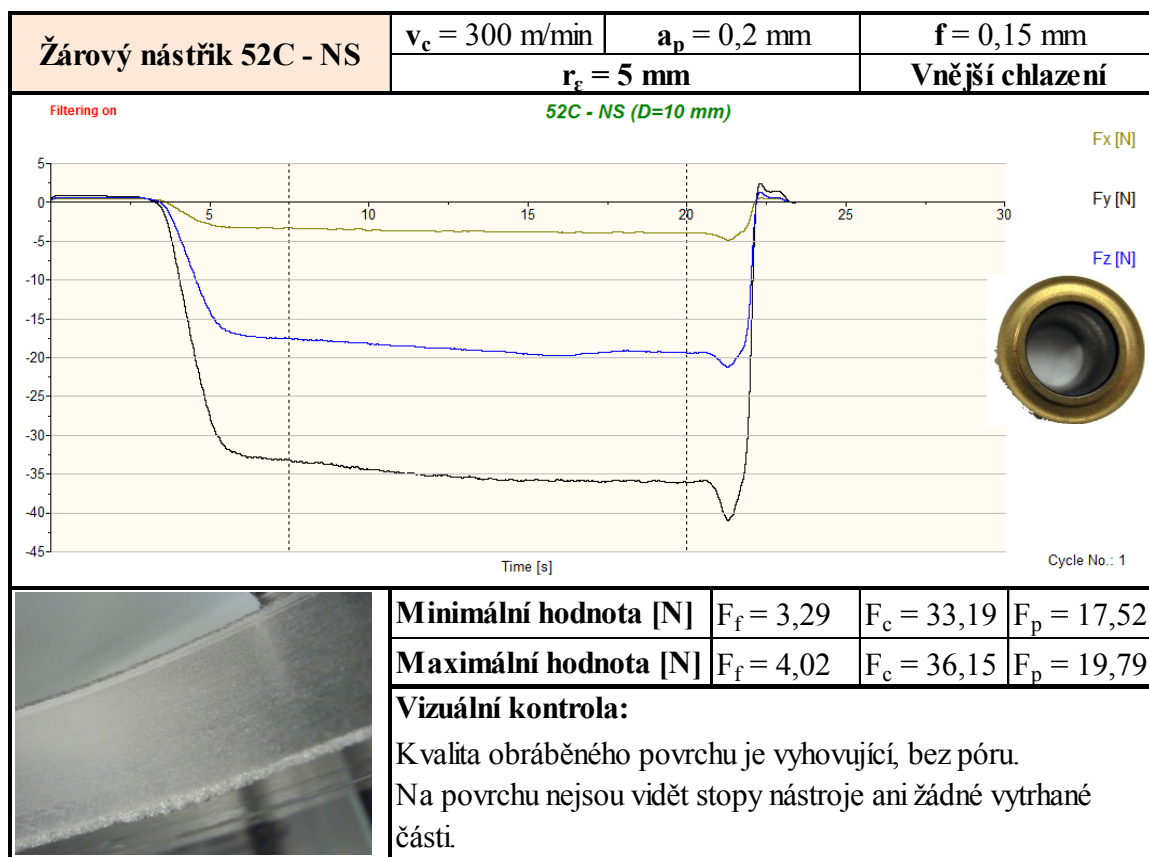
Tab. 4.19 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 3$ mm



Tab. 4.20 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 4$ mm



Tab. 4.21 Průběh měření složek F_f , F_c , F_p u žárového nástřiku 52C -NS s $r_e = 5$ mm



4.3 Statistické zpracování naměřených hodnot

Na základě naměřených hodnot složek řezných sil F_f , F_c , F_p byly zpracovány výsledné síly řezání F pro každý z žárově stříkaných povlaků, které se obráběly různými poloměry vyměnitelných břitových destiček. Výsledné řezné síly byly statisticky zpracovány z naměřených hodnot dle následujících vztahů.

Výběrový průměr naměřených hodnot [21]:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad 4.3.1$$

Výběrová směrodatná odchylka [21]:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad 4.3.2$$

Směrodatná odchylka aritmetického průměru [21]:

$$u_A = s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad 4.3.3$$

Rozšířená nejistota [21]:

$$U = k_U \cdot u_A \quad 4.3.3$$

- pro stanovení rozšířené nejistoty byl použit koeficient rozšíření $k_U = 2$, pravděpodobnost pokrytí $p = 95 \%$.

Výpočet celkové směrodatné odchylky pro celkovou sílu řezání F [21]:

$$F = \sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2} = (\bar{F} \pm U) \quad [N] \quad 4.3.4$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_c} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_c = \frac{F_c}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_c}{F} \quad 4.3.5$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_f = \frac{F_f}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_f}{F} \quad 4.3.6$$

$$\frac{\partial F}{\partial F_p} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} \cdot 2F_p = \frac{F_p}{\sqrt{F_c^2 + F_f^2 + F_p^2}} = \frac{F_p}{F} \quad 4.3.7$$

$$s_{(F)} = \sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial F_c} \cdot s_{(F_c)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_f} \cdot s_{(F_f)}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial F_p} \cdot s_{(F_p)}\right)^2} \quad 4.3.8$$

V následujících tabulkách jsou uvedeny průměrné hodnoty složek řezných sil. Tabulky obsahují hodnoty s jednotlivými vypočtenými hodnotami ze statistického zpracování dat, jako jsou výběrové směrodatné odchylky, směrodatné odchylky aritmetického průměru (nejistota typu A) a rozšířená nejistota. Tyto hodnoty byly potřebné k určení výsledných sil řezání F , pro každou VBD a pro každý žárově stříkaný nástřík. Statisticky zpracované výsledky byly vypočteny z naměřených hodnot umístěných v intervalech viz Tab. 4.1 až Tab. 4.21.

Tab. 4.22 Statistické zpracování hodnot sílového zatížení pro VBD s označením DCGT u žárového nástřiku 601 NS

Žárový nástřik 601 NS										
$r_{\varepsilon} = 0,2 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	6,24	$\bar{F} =$	0,31	$s(F) =$	0,10	$u_A =$	0,02	$U =$	0,04
$F_f = (0,31 \pm 0,04) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	15,60	$\bar{F} =$	0,78	$s(F) =$	0,09	$u_A =$	0,02	$U =$	0,04
$F_c = (0,78 \pm 0,04) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	4,79	$\bar{F} =$	0,24	$s(F) =$	0,04	$u_A =$	0,01	$U =$	0,02
$F_p = (0,24 \pm 0,02) \text{ N}$										
$F = (0,87 \pm 0,09) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 0,4 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	7,72	$\bar{F} =$	0,39	$s(F) =$	0,11	$u_A =$	0,02	$U =$	0,05
$F_f = (0,39 \pm 0,05) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	19,02	$\bar{F} =$	0,95	$s(F) =$	0,10	$u_A =$	0,02	$U =$	0,05
$F_c = (0,95 \pm 0,05) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	6,21	$\bar{F} =$	0,31	$s(F) =$	0,04	$u_A =$	0,01	$U =$	0,02
$F_p = (0,31 \pm 0,02) \text{ N}$										
$F = (1,07 \pm 0,10) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 0,8 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	7,11	$\bar{F} =$	0,36	$s(F) =$	0,09	$u_A =$	0,02	$U =$	0,04
$F_f = (0,36 \pm 0,04) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	23,91	$\bar{F} =$	1,20	$s(F) =$	0,12	$u_A =$	0,03	$U =$	0,05
$F_c = (1,20 \pm 0,05) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	8,07	$\bar{F} =$	0,40	$s(F) =$	0,04	$u_A =$	0,01	$U =$	0,02
$F_p = (0,40 \pm 0,02) \text{ N}$										
$F = (1,31 \pm 0,11) \text{ N}$										

Tab. 4.23 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD s označením RCMT u žárového nástřiku 601 NS

Žárový nástřik 601 NS										
$r_{\varepsilon} = 3 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	2,51	$\bar{F} =$	0,13	$s(F) =$	0,46	$u_A =$	0,10	$U =$	0,20
$F_f = (0,13 \pm 0,20) \text{ N}$										
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	50,94	$\bar{F} =$	2,55	$s(F) =$	0,17	$u_A =$	0,04	$U =$	0,08
$F_c = (2,55 \pm 0,08) \text{ N}$										
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	25,27	$\bar{F} =$	1,26	$s(F) =$	0,11	$u_A =$	0,03	$U =$	0,05
$F_p = (1,26 \pm 0,05) \text{ N}$										
$F = (2,85 \pm 0,17) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 4 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	4,50	$\bar{F} =$	0,22	$s(F) =$	0,10	$u_A =$	0,02	$U =$	0,04
$F_f = (0,22 \pm 0,04) \text{ N}$										
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	52,72	$\bar{F} =$	2,64	$s(F) =$	0,17	$u_A =$	0,04	$U =$	0,08
$F_c = (2,64 \pm 0,08) \text{ N}$										
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	24,17	$\bar{F} =$	1,21	$s(F) =$	0,09	$u_A =$	0,02	$U =$	0,04
$F_p = (1,21 \pm 0,04) \text{ N}$										
$F = (2,91 \pm 0,16) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 5 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	0,20	$\bar{F} =$	0,01	$s(F) =$	0,09	$u_A =$	0,02	$U =$	0,04
$F_f = (0,01 \pm 0,04) \text{ N}$										
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	52,10	$\bar{F} =$	2,61	$s(F) =$	0,13	$u_A =$	0,03	$U =$	0,06
$F_c = (2,61 \pm 0,06) \text{ N}$										
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	20,61	$\bar{F} =$	1,03	$s(F) =$	0,04	$u_A =$	0,01	$U =$	0,02
$F_p = (1,034 \pm 0,02) \text{ N}$										
$F = (2,80 \pm 0,12) \text{ N}$										

Tab. 4.24 Výsledné síly řezání při soustružení žárového nástřiku 601 NS

Žárový nástřik 601 NS	
$r_{\varepsilon} = 0,2 \text{ mm}$	$F = (0,87 \pm 0,09) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 0,4 \text{ mm}$	$F = (1,07 \pm 0,10) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 0,8 \text{ mm}$	$F = (1,31 \pm 0,11) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 3 \text{ mm}$	$F = (2,85 \pm 0,17) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 4 \text{ mm}$	$F = (2,91 \pm 0,16) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 5 \text{ mm}$	$F = (2,80 \pm 0,12) \text{ N}$

Tab. 4.25 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD s označením DCGT u žárového nástřiku 2042

Žárový nástřik 2042									
$r_{\varepsilon} = 0,2 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20					
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	2,19	$\bar{F} =$	0,11	$s(F) =$	0,75	$u_A =$	0,17	$U =$ 0,34
$F_f = (0,11 \pm 0,34) \text{ N}$									
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	68,94	$\bar{F} =$	3,45	$s(F) =$	1,36	$u_A =$	0,30	$U =$ 0,61
$F_c = (3,45 \pm 0,61) \text{ N}$									
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	20,93	$\bar{F} =$	1,05	$s(F) =$	0,10	$u_A =$	0,02	$U =$ 0,04
$F_p = (1,05 \pm 0,04) \text{ N}$									
$F = (3,60 \pm 1,30) \text{ N}$									
$r_{\varepsilon} = 0,4 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20					
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	0,71	$\bar{F} =$	0,04	$s(F) =$	0,64	$u_A =$	0,14	$U =$ 0,28
$F_f = (0,04 \pm 0,28) \text{ N}$									
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	65,73	$\bar{F} =$	3,29	$s(F) =$	0,92	$u_A =$	0,20	$U =$ 0,41
$F_c = (3,29 \pm 0,41) \text{ N}$									
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	18,00	$\bar{F} =$	0,90	$s(F) =$	0,08	$u_A =$	0,02	$U =$ 0,03
$F_p = (0,90 \pm 0,03) \text{ N}$									
$F = (3,41 \pm 0,88) \text{ N}$									
$r_{\varepsilon} = 0,8 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20					
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	6,84	$\bar{F} =$	0,34	$s(F) =$	0,53	$u_A =$	0,12	$U =$ 0,24
$F_f = (0,34 \pm 0,24) \text{ N}$									
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	61,68	$\bar{F} =$	3,08	$s(F) =$	1,13	$u_A =$	0,25	$U =$ 0,50
$F_c = (3,08 \pm 0,50) \text{ N}$									
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	21,73	$\bar{F} =$	1,09	$s(F) =$	0,07	$u_A =$	0,02	$U =$ 0,03
$F_p = (1,09 \pm 0,03) \text{ N}$									
$F = (3,29 \pm 1,06) \text{ N}$									

Tab. 4.26 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD s označením RCMT u žárového nástřiku 2042

Žárový nástřik 2042										
$r_{\varepsilon} = 3 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	0,66	$\bar{F} =$	0,03	$s(F) =$	0,51	$u_A =$	0,11	$U =$	0,23
$F_f = (0,03 \pm 0,23) \text{ N}$										
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	129,21	$\bar{F} =$	6,46	$s(F) =$	0,39	$u_A =$	0,09	$U =$	0,17
$F_c = (6,46 \pm 0,17) \text{ N}$										
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	67,96	$\bar{F} =$	3,40	$s(F) =$	0,20	$u_A =$	0,05	$U =$	0,09
$F_p = (3,40 \pm 0,09) \text{ N}$										
$F = (7,30 \pm 0,35) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 4 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	10,79	$\bar{F} =$	0,54	$s(F) =$	1,27	$u_A =$	0,28	$U =$	0,57
$F_f = (0,54 \pm 0,57) \text{ N}$										
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	141,50	$\bar{F} =$	7,07	$s(F) =$	3,19	$u_A =$	0,71	$U =$	1,42
$F_c = (7,07 \pm 1,42) \text{ N}$										
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	72,58	$\bar{F} =$	3,63	$s(F) =$	0,18	$u_A =$	0,04	$U =$	0,08
$F_p = (3,63 \pm 0,08) \text{ N}$										
$F = (7,97 \pm 2,83) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 5 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
$F_f [\text{N}]$	$\Sigma =$	7,16	$\bar{F} =$	0,36	$s(F) =$	0,32	$u_A =$	0,07	$U =$	0,14
$F_f = (0,36 \pm 0,14) \text{ N}$										
$F_c [\text{N}]$	$\Sigma =$	146,71	$\bar{F} =$	7,34	$s(F) =$	0,42	$u_A =$	0,09	$U =$	0,19
$F_c = (7,34 \pm 0,19) \text{ N}$										
$F_p [\text{N}]$	$\Sigma =$	71,70	$\bar{F} =$	3,58	$s(F) =$	0,11	$u_A =$	0,02	$U =$	0,05
$F_p = (3,58 \pm 0,05) \text{ N}$										
$F = (8,17 \pm 0,38) \text{ N}$										

Tab. 4.27 Výsledné síly řezání při soustružení žárového nástřiku 601 NS

Žárový nástřik 2042	
$r_{\varepsilon} = 0,2 \text{ mm}$	$F = (3,60 \pm 1,30) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 0,4 \text{ mm}$	$F = (3,41 \pm 0,88) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 0,8 \text{ mm}$	$F = (3,29 \pm 1,06) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 3 \text{ mm}$	$F = (7,30 \pm 0,35) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 4 \text{ mm}$	$F = (7,97 \pm 2,83) \text{ N}$
$r_{\varepsilon} = 5 \text{ mm}$	$F = (8,17 \pm 0,38) \text{ N}$

Tab. 4.28 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD s označením DCGT u žárového nástřiku 52C – NS, vnější chlazení

Žárový nástřik 52C - NS (vnější chlazení)										
$r_{\varepsilon} = 0,2 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	81,59	$\bar{F} =$	4,08	$s(F) =$	0,27	$u_A =$	0,06	$U =$	0,12
$F_f = (4,08 \pm 0,12) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	502,30	$\bar{F} =$	25,12	$s(F) =$	0,51	$u_A =$	0,12	$U =$	0,23
$F_c = (25,12 \pm 0,23) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	150,74	$\bar{F} =$	7,54	$s(F) =$	0,14	$u_A =$	0,03	$U =$	0,06
$F_p = (7,54 \pm 0,06) \text{ N}$										
$F = (26,54 \pm 0,49) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 0,4 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	51,53	$\bar{F} =$	2,58	$s(F) =$	0,27	$u_A =$	0,06	$U =$	0,12
$F_f = (2,58 \pm 0,12) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	456,81	$\bar{F} =$	22,84	$s(F) =$	0,44	$u_A =$	0,10	$U =$	0,19
$F_c = (22,84 \pm 0,19) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	120,18	$\bar{F} =$	6,01	$s(F) =$	0,32	$u_A =$	0,07	$U =$	0,14
$F_p = (6,01 \pm 0,14) \text{ N}$										
$F = (23,76 \pm 0,43) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 0,8 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	7,40	$\bar{F} =$	0,37	$s(F) =$	0,30	$u_A =$	0,07	$U =$	0,13
$F_f = (0,37 \pm 0,13) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	557,45	$\bar{F} =$	27,87	$s(F) =$	0,42	$u_A =$	0,09	$U =$	0,19
$F_c = (27,87 \pm 0,19) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	123,94	$\bar{F} =$	6,20	$s(F) =$	0,22	$u_A =$	0,05	$U =$	0,10
$F_p = (6,20 \pm 0,10) \text{ N}$										
$F = (28,56 \pm 0,42) \text{ N}$										

Tab. 4.29 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD s označením DCGT u žárového nástřiku 52C – NS, water jet

Žárový nástřik 52C - NS (water jet)										
$r_{\varepsilon} = 0,2 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	74,25	$\bar{F} =$	3,71	$s(F) =$	0,34	$u_A =$	0,08	$U =$	0,15
$F_f = (3,71 \pm 0,15) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	466,08	$\bar{F} =$	23,30	$s(F) =$	0,42	$u_A =$	0,09	$U =$	0,19
$F_c = (23,30 \pm 0,19) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	126,93	$\bar{F} =$	6,35	$s(F) =$	0,15	$u_A =$	0,03	$U =$	0,07
$F_p = (6,35 \pm 0,07) \text{ N}$										
$F = (24,44 \pm 0,41) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 0,4 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	43,39	$\bar{F} =$	2,17	$s(F) =$	0,19	$u_A =$	0,04	$U =$	0,08
$F_f = (2,17 \pm 0,08) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	426,22	$\bar{F} =$	21,31	$s(F) =$	0,37	$u_A =$	0,08	$U =$	0,17
$F_c = (21,31 \pm 0,17) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	127,67	$\bar{F} =$	6,38	$s(F) =$	0,12	$u_A =$	0,03	$U =$	0,06
$F_p = (6,38 \pm 0,06) \text{ N}$										
$F = (22,35 \pm 0,35) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 0,8 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	53,87	$\bar{F} =$	2,69	$s(F) =$	0,24	$u_A =$	0,05	$U =$	0,11
$F_f = (2,69 \pm 0,11) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	457,50	$\bar{F} =$	22,88	$s(F) =$	0,34	$u_A =$	0,08	$U =$	0,15
$F_c = (22,88 \pm 0,15) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	155,88	$\bar{F} =$	7,79	$s(F) =$	0,11	$u_A =$	0,02	$U =$	0,05
$F_p = (7,79 \pm 0,05) \text{ N}$										
$F = (24,32 \pm 0,32) \text{ N}$										

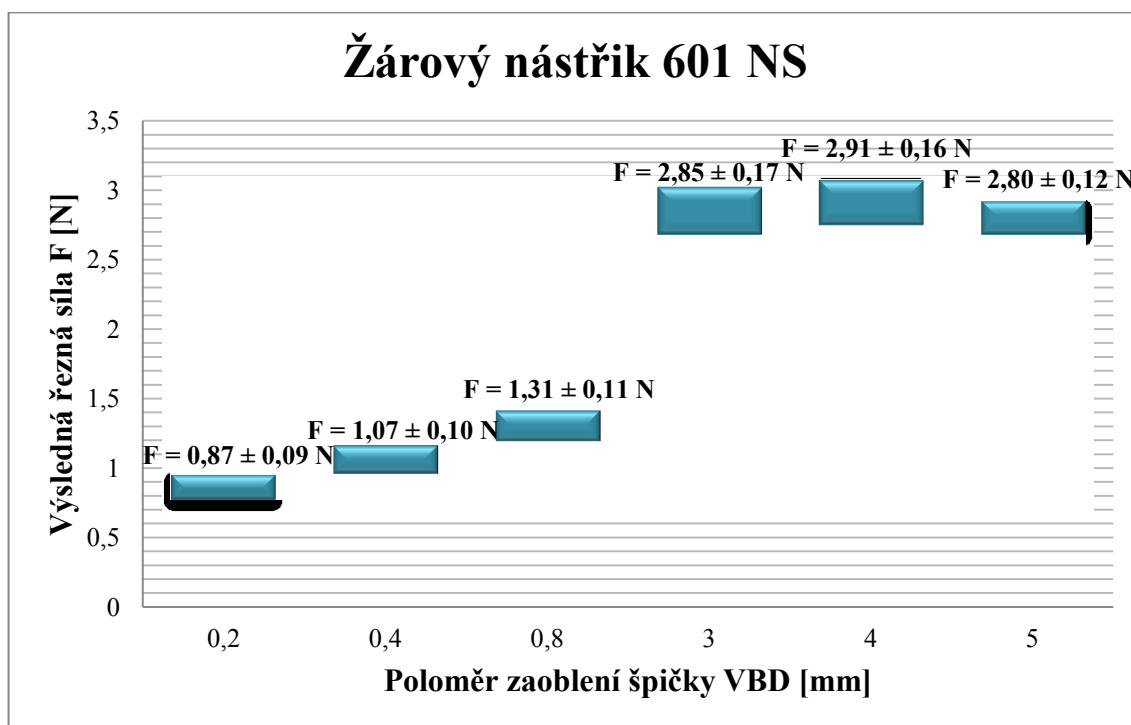
Tab. 4.30 Statistické zpracování hodnot silového zatížení pro VBD s označením RCMT u žárového nástřiku 52C – NS, vnější chlazení

Žárový nástřik 52C - NS (vnější chlazení)										
$r_{\varepsilon} = 3 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	100,81	$\bar{F} =$	5,04	$s(F) =$	0,51	$u_A =$	0,11	$U =$	0,23
$F_f = (5,04 \pm 0,23) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	763,27	$\bar{F} =$	38,16	$s(F) =$	0,28	$u_A =$	0,06	$U =$	0,13
$F_c = (38,16 \pm 0,13) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	393,88	$\bar{F} =$	19,69	$s(F) =$	0,15	$u_A =$	0,03	$U =$	0,07
$F_p = (19,69 \pm 0,07) \text{ N}$										
$F = (43,24 \pm 0,27) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 4 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	73,37	$\bar{F} =$	3,67	$s(F) =$	0,22	$u_A =$	0,05	$U =$	0,10
$F_f = (3,67 \pm 0,10) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	747,46	$\bar{F} =$	37,37	$s(F) =$	0,37	$u_A =$	0,08	$U =$	0,17
$F_c = (37,37 \pm 0,17) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	376,72	$\bar{F} =$	18,84	$s(F) =$	0,27	$u_A =$	0,06	$U =$	0,12
$F_p = (18,84 \pm 0,12) \text{ N}$										
$F = (42,01 \pm 0,35) \text{ N}$										
$r_{\varepsilon} = 5 \text{ mm}$				počet statisticky zpracovaných hodnot = 20						
F_f [N]	$\Sigma =$	72,69	$\bar{F} =$	3,63	$s(F) =$	0,69	$u_A =$	0,15	$U =$	0,31
$F_f = (3,63 \pm 0,31) \text{ N}$										
F_c [N]	$\Sigma =$	697,49	$\bar{F} =$	34,87	$s(F) =$	4,13	$u_A =$	0,92	$U =$	1,85
$F_c = (34,87 \pm 1,85) \text{ N}$										
F_p [N]	$\Sigma =$	374,71	$\bar{F} =$	18,74	$s(F) =$	2,34	$u_A =$	0,52	$U =$	1,05
$F_p = (18,74 \pm 1,05) \text{ N}$										
$F = (39,76 \pm 3,78) \text{ N}$										

Tab. 4.31 Výsledné síly řezání při soustružení žárového nástřiku 52C – NS

Žárový nástřik 52C - NS		
$r_\epsilon = 0,2 \text{ mm}$	$F = (26,54 \pm 0,49) \text{ N}$	Vnější chlazení
$r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$	$F = (23,76 \pm 0,43) \text{ N}$	
$r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$	$F = (28,56 \pm 0,42) \text{ N}$	
$r_\epsilon = 0,2 \text{ mm}$	$F = (24,44 \pm 0,41) \text{ N}$	Water Jet
$r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$	$F = (22,35 \pm 0,35) \text{ N}$	
$r_\epsilon = 0,8 \text{ mm}$	$F = (24,32 \pm 0,32) \text{ N}$	
$r_\epsilon = 3 \text{ mm}$	$F = (43,24 \pm 0,27) \text{ N}$	Vnější chlazení
$r_\epsilon = 4 \text{ mm}$	$F = (42,01 \pm 0,35) \text{ N}$	
$r_\epsilon = 5 \text{ mm}$	$F = (39,76 \pm 3,78) \text{ N}$	

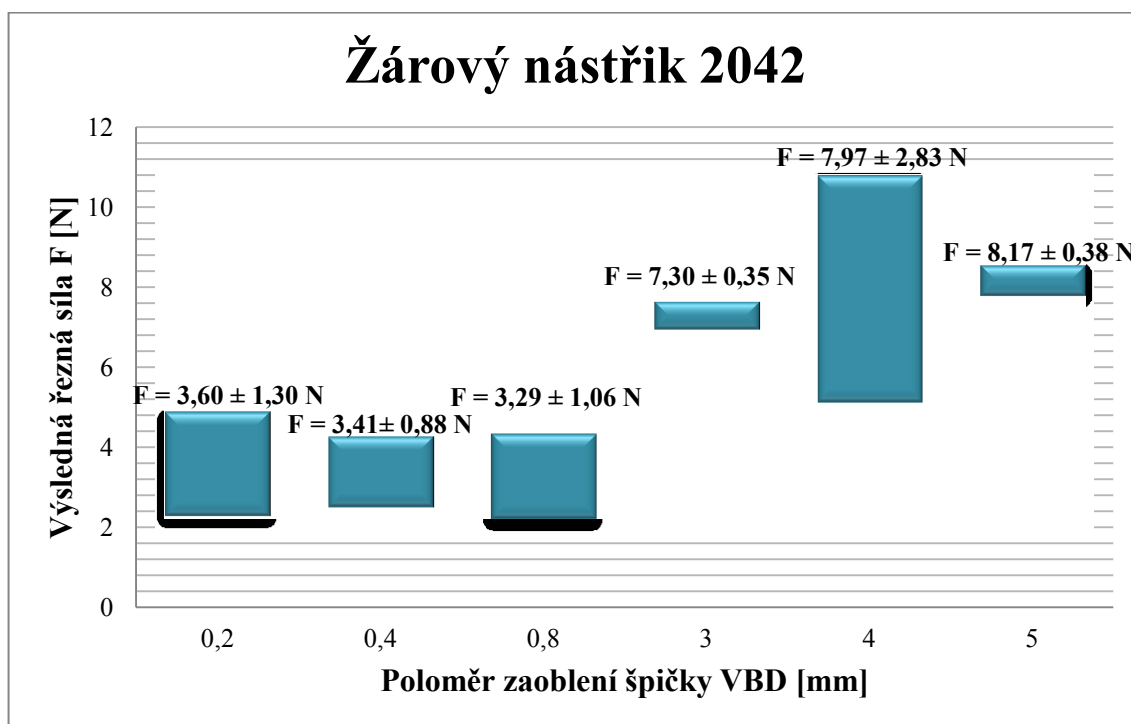
V následujících grafech jsou zobrazeny výsledné síly řezání, které se vyskytovaly během procesu obrábění žárových nástřiků různými vyměnitelnými břitovými destičkami.



Graf 4.1 Závislost výsledné řezné síly na poloměru zaoblení špičky VBD

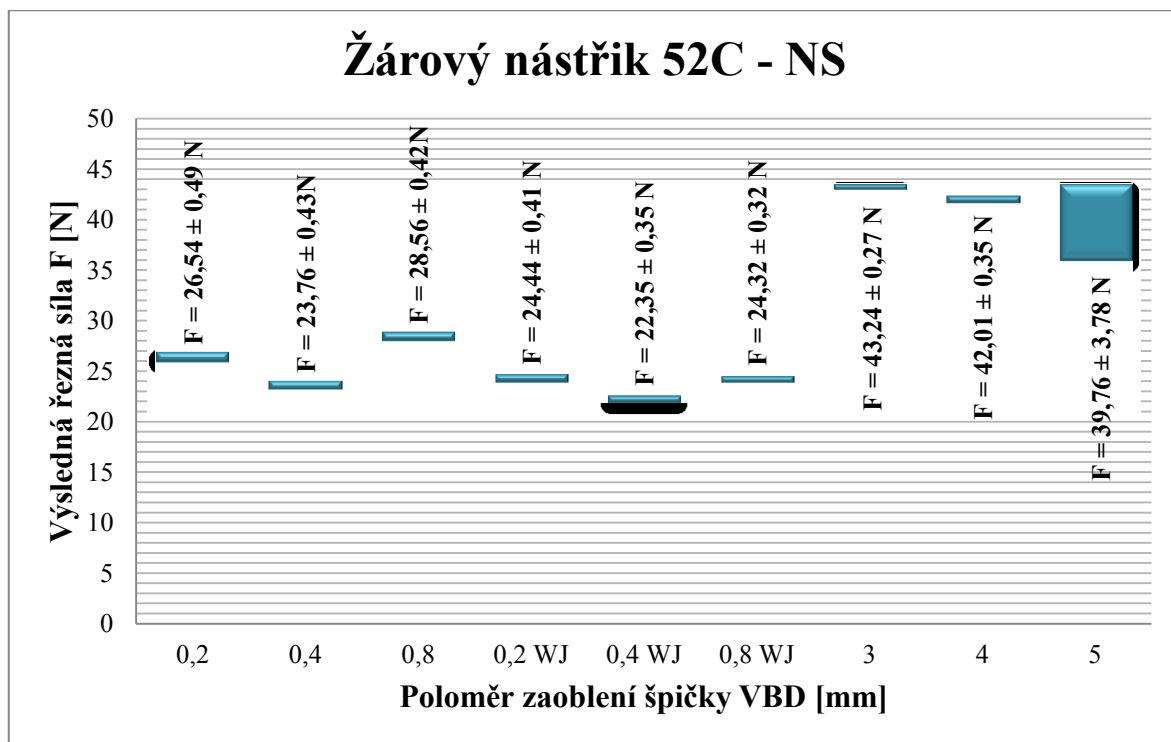
Z grafu 4.1 je patrné, že výsledné síly řezání během obrábění žárového nástřiku 601 NS nedosahují vysokých hodnot. Výsledné řezné síly nebyly vysoké z důvodu obrábění vysoce porézního povlaku ($\leq 65\%$). Z grafu 4.1 lze také vyčíst, že řezné síly rostly s poloměrem zaoblení špičky. Vyměnitelné břitové destičky s poloměry zaoblení

špičky 3, 4, 5 byly VBD s kruhovou geometrií, u kterých byla výsledná řezná síla naměřena větší než u neokrouhových destiček. Ovšem povrch obrobený kruhovými destičkami měl po vizuální stránce větší kvalitu.



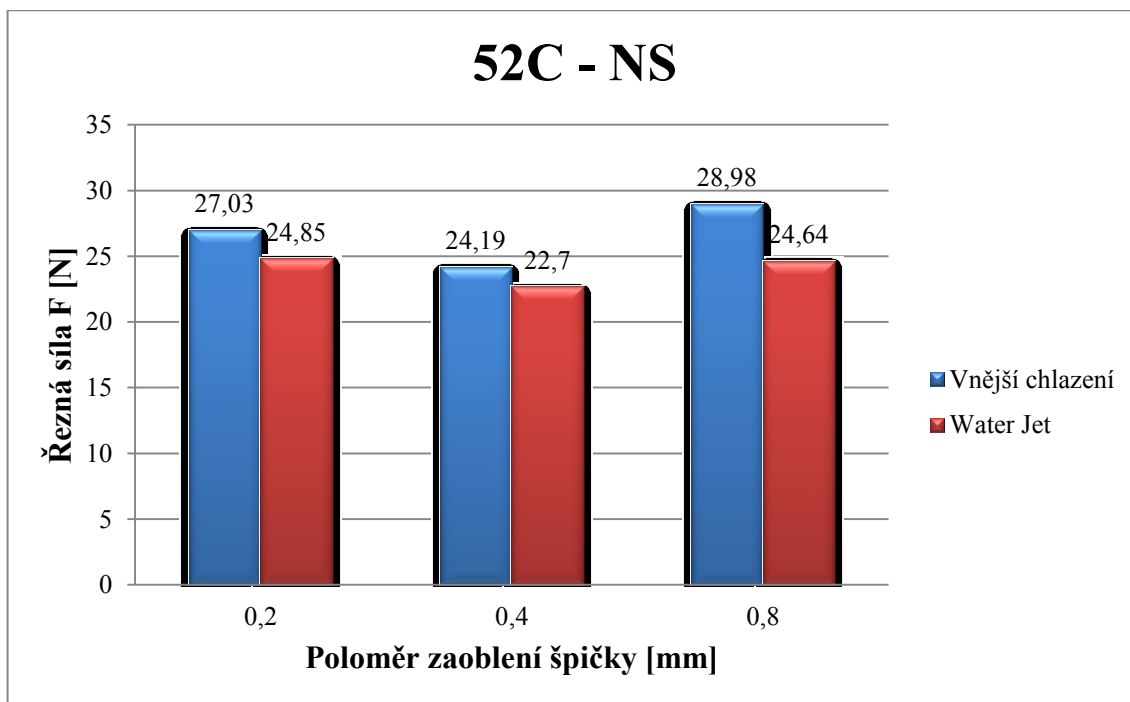
Graf 4.2 Závislost výsledné řezné síly na poloměru zaoblení špičky VBD

V grafu 4.2 jde vidět rozdíl od grafu 4.1. Výsledné řezné síly u žárového nástřiku 2042 byly větší a rozšířená nejistota nabývá také větších hodnot. Jednalo se rovněž o porézní povlak (50 - 60%). Kvalitněji obrobený povrch byl stejně jako u žárového nástřiku 601 NS u vyměnitelných břitových destiček s kruhovou geometrií.



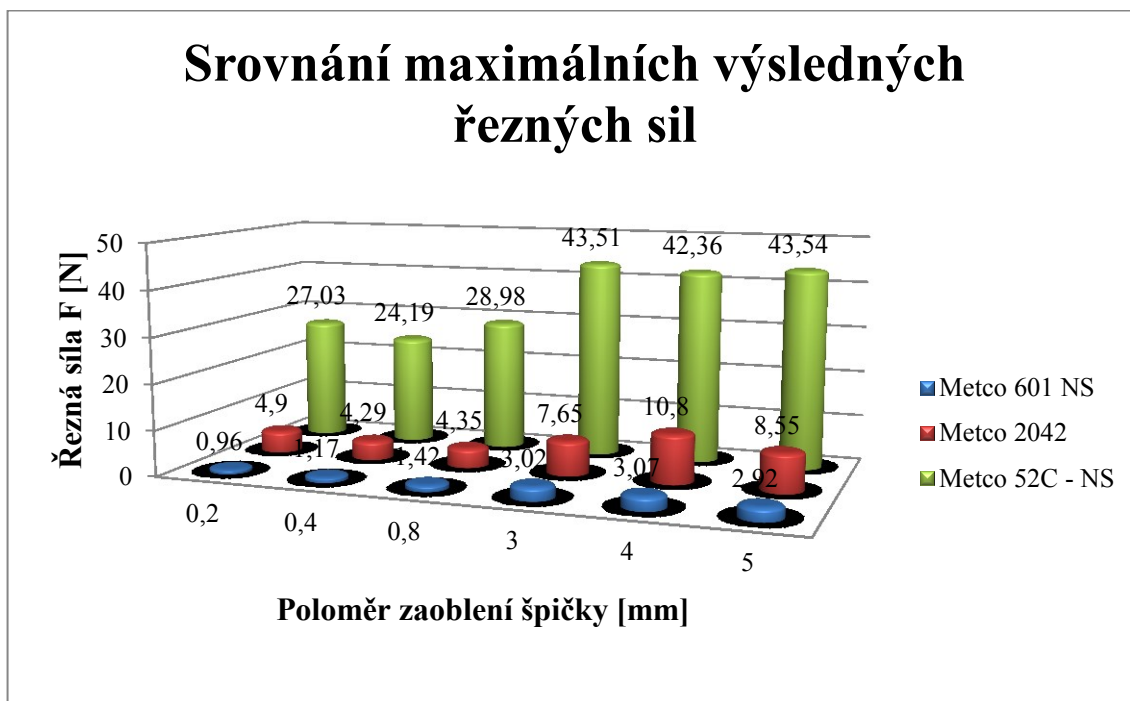
Graf 4.3 Závislost výsledné řezné síly na poloměru zaoblění špičky VBD

U žárově stříkaného povlaku 52C – NS bylo použito vnější chlazení a při obrábění s vyměnitelnými břitovými destičkami s označením DCGT byl použit navíc systém chlazení „water jet“. V grafu 4.3 je označeno chlazení „water jet“ zkratkou „WJ“. Výsledné řezné síly dosahují u žárového nástříku 52C – NS výrazně vyšších hodnot, než byly u žárových nástříků 601 NS a 2042. Vysokých hodnot dosahují proto, že se nejedná o porézní povlak. Pórovitost žárového nástříku 52C – NS se pohybuje do 2%. Stejně jako u porézních nástříků, tak u žárového nástříku 52C – NS, byl po vizuální kontrole lépe obrobený povrch destičkami kruhové geometrie, než s destičkami s neokružovou geometrií. Při porovnání výsledných řezných sil u obrábění vyměnitelnými břitovými destičkami s označením DCGT bylo v prvním případě použito vnější chlazení a v druhém případě chlazení „water jet“. Výsledné řezné síly při soustružení s použitým chlazením „water jet“ jsou nižší, než při použití vnějšího chlazení viz graf 4.4.



Graf 4.4 Závislost maximální řezné síly na systému chlazení

V následujícím grafu 4.5 je patrné, že naměřené hodnoty výsledných řezných sil při obrábění žárového nástřiku 52C – NS jsou výrazně vyšší, než jsou výsledné řezné síly u žárových nástřiků 2042 a 601 NS.



Graf 4.5 Srovnání maximálních výsledných řezných sil u jednotlivých žárových nástřiků

Závěr

Tato práce se zabývala obráběním žárově stříkaných abradable nástřiků. Cílem diplomové práce bylo naměření řezných složek sil během procesu obrábění a následné vyhodnocení naměřených dat. Obrábění probíhalo na soustružnicko frézovacím centru v laboratoři obrábění na VŠB – TU v Ostravě. K obrábění byly k dispozici testovací mezikruží. Na které byly nanесeny tři druhy žárových nástřiků. Které se nanášely plazmovým nástřikem. Použité nástroje byly vyměnitelné břitové destičky kruhové a ostré geometrie s různými poloměry zaoblení řezné hrany. Obrábění probíhalo za konstantních řezných parametrů pro všechny druhy obráběných materiálů a zvolených VBD. Měření probíhalo za pomoci tříslžkového dynamometru Kistler a počítačového softwaru Dynoware.

Naměřené hodnoty byly vyhodnoceny v grafu, ve kterém byly po filtrování zobrazeny průběhy řezných složek sil působící na nástroj během procesu obrábění. Vyfiltrovaná data byla statisticky zpracována a byly vypočteny výsledné řezné síly pro každou vyměnitelnou břitovou destičku. Výsledné síly řezání odpovídaly teorii obrábění, kdy při obrábění vyměnitelnými břitovými destičkami s menšími poloměry zaoblení řezné hrany byly řezné složky sil menší než u VBD s většími poloměry zaoblení řezné hrany. Řezné složky sil u žárového nástřiku 52C – NS nabývaly výrazně větších hodnot, než tomu bylo u žárových nástřiků 601 NS a 2042. Příčinou bylo, že žárový nástřik 52C – NS je minimálně pórovitý oproti žárovým nástřikům 601 NS a 2042, u kterých se pórovitost pohybuje od 50 – 65%.

U pórovitých žárových nástřiků se nedoporučuje chlazení. U žárového nástřiku 52C – NS se chlazení během obrábění doporučuje, proto bylo použito vnější chlazení při obrábění všemi druhy VBD. Držáky pro VBD s ostrou geometrií, měly možnost použít chlazení „water jet“. Proto bylo u VBD s poloměry zaoblení špičky 0,2; 0,4; 0,8 mm použito navíc chlazení „water jet“ a následně byly porovnány výsledné řezné síly, které působily na nástroj během obrábění s vnějším chlazením a chlazením „water jet“. Výsledné řezné síly byly menší při chlazení s „water jetem“.

Poděkování

Práce byla podpořena ze Studentské grantové soutěže Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava v rámci projektu SP2016/172 Vliv technologických parametrů na obrobený povrch a SP2016/174 Studium procesu obrábění progresivních materiálů s cílem zvýšit a podpořit vědecko-výzkumné aktivity studentů doktorských a magisterských studijních programů ve spolupráci s akademickými pracovníky.

Touto cestou bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Tomáši Zlámalovi, Ph.D. za vstřícný přístup a cenné rady. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Pavlu Krajčovičovi za odborné konzultace a za poskytnuté materiály.

Použitá literatura

- [1] ZAHÁLKA, František a Radek ENŽL. Žárově stříkané povlaky - moderní technologie tvorby povrchových ochran [online]. 2005: [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zarove-strikane-povlaky-moderni-technologie-tvorby-povrchovych-ochra.html>
- [2] SCHUBERT, Jan. Žárové nástřiky. *Výzkumný a zkušební ústav Plzeň s.r.o.* [online]. : 1 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.vzuplzen.cz/zarove-nastriky/technologie.php>
- [3] *Thermal Spray Equipment* [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.oerlikon.com/metco/en/products-services/coating-equipment/thermal-spray/>
- [4] Žárové nástřiky. *Technologie* [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://zarovenastriky.cz/technologie>
- [5] Thermal spray coatings. *Plasma spray* [online]. [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: http://www.tstcoatings.com/plasma_spray.html
- [6] Technologie žárového nástřiku v leteckém průmyslu [online]. [cit. 2015-12-29]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-zaroveho-nastriku-v-leteckem-prumyslu.html>
- [7] Žárové stříkání [online]. [cit. 2016-01-04]. Dostupné z: <http://www.plasmametal.cz/pouzite-technologie>
- [8] Mettech [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.mettech.com/coating-solutions/index.php>
- [9] Ellison Surface technologies [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z: <http://www.ellisonsurfacetech.com/pages/dvctbc.html>
- [10] HVOF Thermal Spraying with Tungsten Carbide [online]. [cit. 2016-01-05]. Dostupné z : <http://www.hfwindustries.com/blog/2014/01/hvof-thermal-spraying-with-tungsten-carbide-5/>
- [11] Bodycote. *Povrchové úpravy* [online]. [cit. 2016-02-20]. Dostupné z: <http://www.bodycote.com/cs-CZ/services/surface-technology.aspx>

- [12] ČSN EN ISO 14924. Žárové stříkání *Dodatečné úpravy a konečná úprava žárově stříkaných povlaků*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [13] SEDLÁČEK, Alexandr. Otěruvzdorné povlaky vytvářené metodami žárového nástřiku. *S. A. F. Praha, spol. s r. o.* Praha.
- [14] Sulzer Metco; *The coatings company*. [online] Dostupné z: <https://www.sulzer.com/>
- [15] Katalog a technický průvodce 2015. *Secotools*. [online] Dostupné z: <https://www.secotools.com/cs/CZ-Czech-Republic/Home/>
- [16] Hoffmann Group. *Tool to make you better* [online] Dostupné z: <https://www.hoffmann-group.com/CZ/cs/hot/>
- [17] BRYCHTA, J.; ČEP, R.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Technologie II – 1. díl*. Ostrava : Ediční středisko VŠB – TU Ostrava. ISBN 978–80–248–1641–8.
- [18] ČEP, R.; PETRŮ, J. *Experimentální metody v obrábění*. Ostrava : Katedra obrábění a montáže FS VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2011, s. 143. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [19] MCCOMAS, Charles C., John W. APPLEBY JR., Gerard A. SILEO, Herber R. BARRINGER a Michael J. PATRY. *Liquid jet removal of plasma sprayed and sintered*. Přihlášeno 5. prosinec 1991. Uděleno 1. prosinec 1992.
- [20] ČEP, R.; BRYCHTA, J.; SADÍLEK, M.; NOVÁKOVÁ, J.; PETŘKOVSKÁ, L. *Nové směry v progresivním obrábění*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2007. s. 251. ISBN 978-80- 248-1505-3.
- [21] TICHÁ, Š.: *Strojírenská metrologie*. Ostrava, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2006. s. 112. ISBN 80-248-0671-1.